

Scuola di Scienze
Dipartimento di Fisica e Astronomia
Corso di Laurea in Fisica

**Realizzazione di un sistema automatico
di test per rivelatori al Silicio e studio
preliminare di una matrice 2x2 con UFSD**

Relatore:

Prof.ssa Gilda Scioli

Correlatore:

Dr. Rosario Nania

Presentata da:

Gianpiero Vignola

Abstract

Obiettivo di questo studio è quello di realizzare un programma per la caratterizzazione degli innovativi rivelatori UFSD (Ultra Fast Silicon Detectors) a disposizione della sede di Bologna dell'INFN, per poi passare all'analisi preliminare di un prototipo di matrice 2×2 di rivelatori dello stesso tipo.

I risultati ottenuti sono stati confrontati con le caratteristiche fornite dai costruttori. Per quanto riguarda la matrice, si sono effettuate delle scansioni utilizzando una fonte laser. Si è quindi valutata la risposta del dispositivo concentrandosi sulle differenze in ampiezza dei segnali ottenuti.

Nel Capitolo 1 si illustrano brevemente i principi fisici alla base del funzionamento dei rivelatori al silicio, soffermandosi principalmente su quelli caratterizzati dalla presenza di uno strato di guadagno interno.

Nel Capitolo 2 viene descritto l'apparato di misura utilizzato, i rivelatori analizzati e i programmi LabVIEW che ho realizzato per effettuare le misure. Questi sono stati progettati nell'ottica di rendere rapide ed efficienti le future caratterizzazioni di UFSD o altri dispositivi a semiconduttore.

I risultati ottenuti sono mostrati e analizzati nel Capitolo 3.

Indice

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Semiconduttori nella rivelazione di particelle | 3 |
| 1.1 | Principi fisici della rivelazione | 3 |
| 1.1.1 | Livelli energetici nei solidi | 3 |
| 1.1.2 | Coppia elettrone-lacuna nei semiconduttori | 5 |
| 1.1.3 | Drogaggio | 5 |
| 1.1.4 | Giunzione p-n | 6 |
| 1.1.5 | Caratteristica I-V di una giunzione PN | 8 |
| 1.1.6 | Interazione con particelle ionizzanti | 9 |
| 1.2 | Rivelatori al silicio con guadagno | 11 |
| 1.2.1 | APD | 11 |
| 1.2.2 | SiPM | 12 |
| 1.2.3 | LGAD | 13 |
| 1.3 | Ultra Fast Silicon Detector | 13 |
| 1.3.1 | Spessore | 13 |
| 1.3.2 | Risoluzione temporale | 15 |
| 1.3.3 | Applicazioni | 15 |
| 2 | Setup sperimentale | 17 |
| 2.1 | Rivelatori analizzati e strumenti di misura | 17 |
| 2.1.1 | Rivelatori UFSD utilizzati | 17 |
| 2.1.2 | Alimentatore rivelatori | 18 |
| 2.1.3 | Amplificatore matrice | 21 |
| 2.1.4 | Picoamperometro | 21 |
| 2.1.5 | Fonte laser | 21 |
| 2.1.6 | Oscilloscopio | 22 |
| 2.1.7 | Movimentatore | 22 |
| 2.2 | Programmi LabVIEW realizzati | 22 |
| 2.2.1 | Misura della caratteristica I-V | 24 |
| 2.2.2 | Controllo movimentatore con feedback posizione | 26 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2.2.3 | Block Diagrams | 28 |
| 3 | Risultati e Analisi | 33 |
| 3.1 | Caratteristiche I-V | 33 |
| 3.1.1 | UFSD A, B e C | 33 |
| 3.1.2 | UFSD D0, D1, E, H e Matrice | 35 |
| 3.1.3 | Comportamento nelle regioni instabili | 38 |
| 3.2 | Matrice UFSD 2x2 | 39 |
| 3.2.1 | Risultati delle scansioni | 40 |
| 3.2.2 | Differenze fra i 4 UFSD | 45 |
| | Conclusioni | 47 |
| | Appendici | 47 |
| | Appendice A | 48 |
| | Appendice B | 49 |
| | Appendice C | 50 |
| | Appendice D | 51 |
| | Bibliografia | 52 |

Capitolo 1

Semiconduttori nella rivelazione di particelle

1.1 Principi fisici della rivelazione

Dapprima utilizzati solo in ambiti di ricerca, i rivelatori a semiconduttore sono ormai diffusi in moltissimi contesti commerciali (fotografia, robotica, medicina,...). Il motivo di ciò è legato alle loro peculiarità: elevata densità e integrazione, sensibilità, resistenza alle radiazioni, costi di produzione relativamente bassi.

In questo capitolo si intende esplorare i principi base del loro funzionamento. Si passerà poi all'analisi di alcuni rivelatori al silicio con particolare enfasi sull'innovativo rivelatore UFSD che rappresenta l'attuale frontiera tecnologica nell'ambito della risoluzione temporale.

1.1.1 Livelli energetici nei solidi

Gli atomi di quasi la totalità degli elementi noti, si trovano, allo stato solido, organizzati in strutture cristalline caratterizzate dalla ripetizione di una cella unitaria elementare più o meno complessa. In questa configurazione gli atomi costituenti del cristallo non possono più considerarsi isolati e la trattazione analitica delle funzioni d'onda associata diventa più articolata. Bisogna ora tenere conto dell'interazione fra atomi che genera un potenziale che è funzione dello spazio. I livelli energetici corrispondenti alle shell più interne sono poco influenzati dalla configurazione cristallina, mentre quelli esterni tendono a 'fondersi' fra loro generando dei livelli energetici condivisi fra più atomi del cristallo. Gli elettroni più esterni, quindi, non sono più associabili al singolo atomo ma possono essere visti come condivisi con tutto il cristallo.

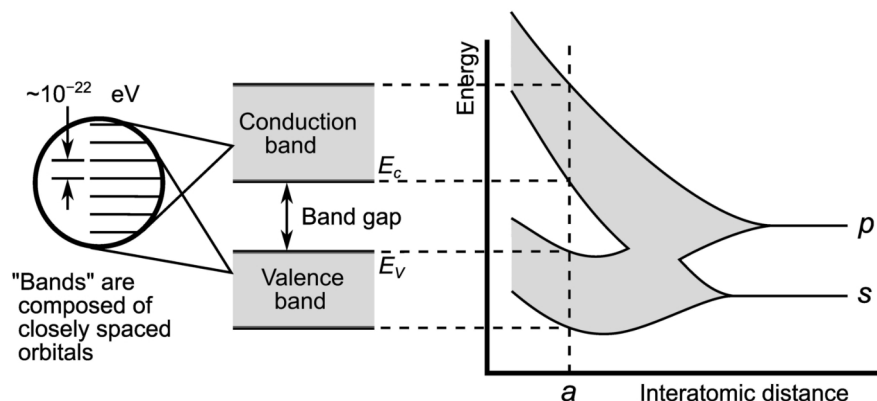


Figura 1.1: *Variazione dei livelli energetici in funzione della distanza interatomica*

Attraverso una trattazione analitica, si giunge alla definizione dei livelli energetici di un cristallo che, a differenza di quelli relativi agli atomi isolati dove ci sono livelli singoli, è caratterizzato da ‘bande’ energetiche separate fra loro da gap (Figura 1.1). Gli elettroni sono dei fermioni e si dispongono negli stati energetici liberi secondo il principio di esclusione di Pauli. Supponendo di porre il cristallo a 0K si riempiranno stati energetici fino al ‘livello di Fermi’ e avremo dunque un certo numero di bande energetiche occupate, l’ultima di questa prende il nome di “banda di valenza” ed è separata da quella energeticamente superiore, “banda di conduzione”, da un gap più o meno ampio. Questo processo determina la classificazione del cristallo (Figura 1.2):

- Se il livello di Fermi cade all’interno di una banda allora questa risulterà semi-piena, banda di valenza e banda di conduzione sono sovrapposte; gli elettroni sono liberi di spostarsi fra livelli energetici adiacenti. Questi elementi sono classificati come conduttori.
- Quando il livello di Fermi si trova in un gap a 0 K la banda di valenza risulta completamente piena e quella di conduzione vuota. Più è grande il gap energetico più è alta l’energia necessaria per portare un elettrone in conduzione. Quando il gap è di diversi eV si parla di isolanti.
- Riprendendo il caso precedente, se la banda di energie proibite è sufficientemente piccola (a temperatura ambiente il silicio ha un gap di circa 1,12 eV) il comportamento è intermedio fra quello di un conduttore e quello di un isolante, si parla dunque di semiconduttori.

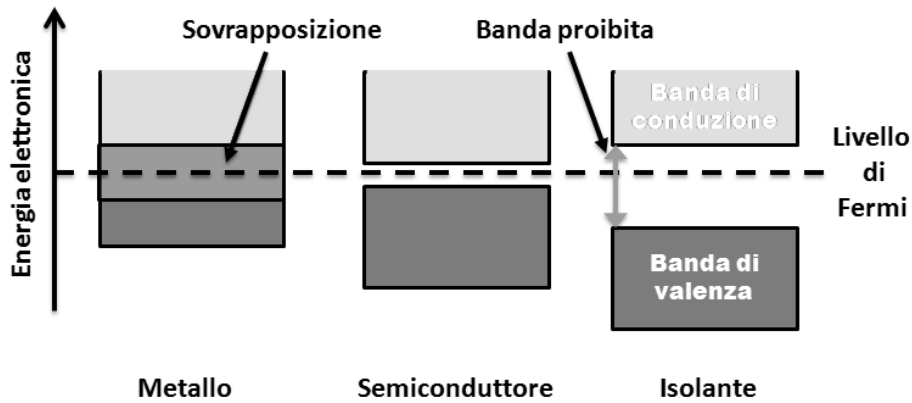


Figura 1.2: Gap fra bande di valenza e conduzione nei diversi tipi di solidi

1.1.2 Coppia elettrone-lacuna nei semiconduttori

Concentrandoci sui semiconduttori, analizziamo a titolo di esempio il caso del silicio. È un elemento del quarto gruppo, la sua energia di gap è di circa 1.1 eV a temperatura ambiente e in una struttura cristallina forma legami covalenti con altri quattro atomi. Il silicio a temperatura ambiente ha una concentrazione di carica intrinseca di $1.45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$; la sola energia termica, infatti, è sufficiente per rompere alcuni legami e far passare elettroni nella banda di conduzione (Figura 1.3). L'elettrone eccitato è libero di muoversi nel cristallo e lascia scoperta una posizione detta 'lacuna'. Anche questa può muoversi nel cristallo, infatti un elettrone appartenente ad un legame covalente vicino può lasciare quest'ultimo per andare ad occupare la lacuna generando di fatto un 'moto' di questa. Sia elettroni che lacune sono responsabili della conduzione. Quando però ad occupare una lacuna è un elettrone di conduzione si ha una perdita di carica libera (viene meno una coppia elettrone-lacuna), questo processo è chiamato 'ricombinazione'. Una coppia elettrone lacuna ha dunque una vita media finita che è compresa fra 1 e 100 μs . Questo parametro è di fondamentale importanza nelle applicazioni in quanto rappresenta il tempo necessario per raggiungere una configurazione stabile una volta che un cristallo di semiconduttore ha subito delle variazioni nella concentrazione dei portatori di carica.

1.1.3 Drogaggio

Il processo di drogaggio viene effettuato aggiungendo al semiconduttore delle impurezze costituite da atomi con diverso numero di elettroni di valenza. Se ad esempio abbiamo a che fare con semiconduttori del IV gruppo come Si e Ge, tipiche impurezze sono costituite da elementi del III e V gruppo. A seconda del tipo di impurezza usata, si aggiungeranno quindi al cristallo lacune (impurezze del III gruppo) o elettroni

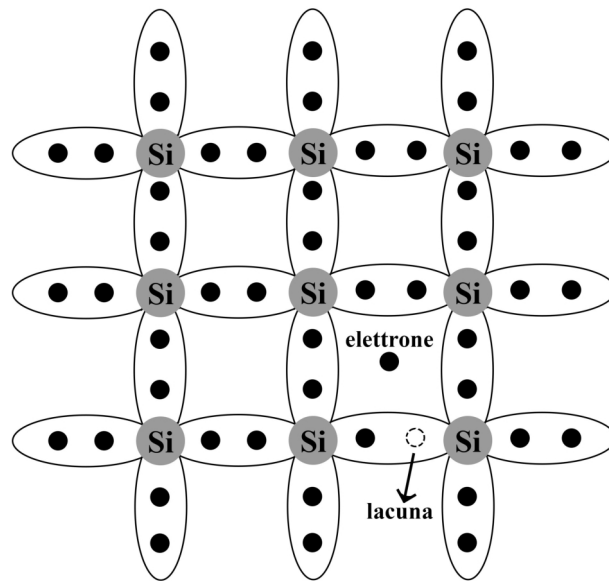


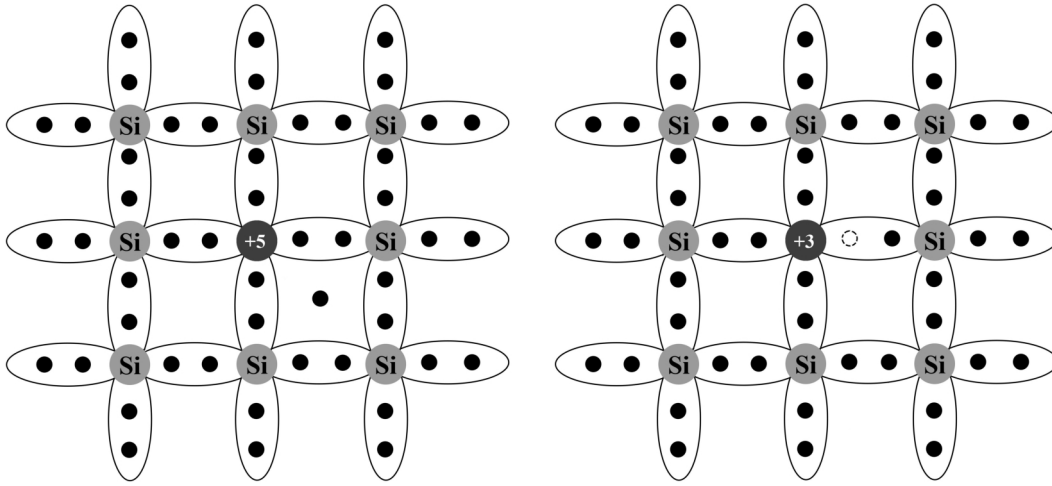
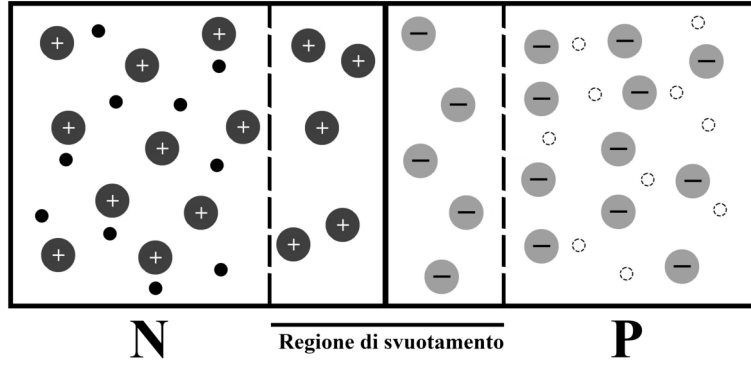
Figura 1.3: *Creazione coppia elettrone-lacuna in un cristallo di silicio*

(impurezze del V gruppo). Abbiamo quindi che il nostro cristallo di semiconduttore avrà una concentrazione intrinseca di portatori di carica, indipendentemente dalla creazione di coppie elettrone-lacuna. I cristalli drogati con atomi accettori, ossia con numero atomico inferiore, sono detti di ‘tipo P’; quelli drogati con atomi donatori sono invece chiamati di ‘tipo N’ (Figura 1.4).

Livelli di drogaggio standard sono dell’ordine di un atomo di impurezza ogni $10^6 \div 10^8$ atomi di semiconduttore; dato il numero di atomi in un cm^3 di silicio dell’ordine di 10^{22} , la concentrazione delle cariche dovute alle impurezze è quindi di $10^{14} \div 10^{16} \text{cm}^{-3}$ che paragonata a quella delle coppie elettrone-lacuna (vista nel paragrafo precedente) risulta di gran lunga superiore. Per livelli di drogaggio standard, quindi, i portatori di carica sono prevalentemente dovuti al drogaggio, questi vengono detti ‘maggioritari’ e sono: elettroni nei cristalli drogati N e lacune nei cristalli drogati P.

1.1.4 Giunzione p-n

Mettendo in contatto un semiconduttore drogato P e uno drogato N si forma una giunzione detta appunto P-N. Le differenze di concentrazioni di elettroni e lacune nei pressi della giunzione innescano una corrente spontanea di elettroni dalla regione di tipo N a quella di tipo P e lacune in direzione opposta. Passate nella regione nella quale risultano minoritarie, le cariche tendono a ricombinarsi con i maggioritari presenti in questa zona lasciando scoperte cariche positive nella regione N e negative nella regione P (a causa della presenza di ioni degli atomi usati per il drogaggio) e


 Figura 1.4: *Cristallo di silicio drogato N a sinistra, P a destra*

 Figura 1.5: *Giunzione PN*

creando quella che viene chiamata ‘regione di svuotamento’ (Figura 1.5).

Si genera quindi un campo elettrico nella regione della giunzione; il processo si arresta quando questo diventa talmente intenso da impedire il moto delle cariche intrinseche fra le due regioni. Valori tipici del campo elettrico sono dell’ordine di $10^4 \div 10^5 \text{ V/cm}$ mentre la regione di svuotamento, con la giunzione PN isolata, ha spessori dell’ordine di $(10^{-2} \div 1) \mu\text{m}$. Si supponga ora di applicare una differenza di potenziale alle estremità della nostra giunzione (Figura 1.6) Possiamo distinguere due casi:

- Polarizzazione diretta: la tensione positiva è applicata alla regione drogata P e quella negativa alla regione drogata N. in queste condizioni i portatori di carica maggioritari vengono attratti verso la regione opposta, la regione di svuotamento si restringe in maniera proporzionale alla tensione applicata.
- Polarizzazione inversa: la tensione positiva è applicata alla regione drogata N

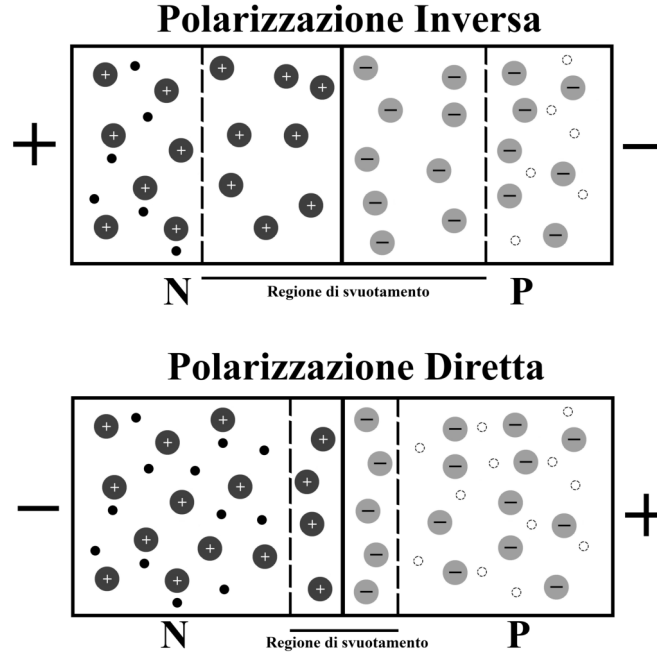


Figura 1.6: Giunzione PN con le due possibili polarizzazioni

e quella negativa alla regione drogata P. I portatori maggioritari si allontanano dalla giunzione, aumenta quindi lo spessore della regione di svuotamento.

1.1.5 Caratteristica I-V di una giunzione PN

Il termine *Caratteristica* di una giunzione PN si riferisce al grafico I-V che mostra l'andamento della corrente in funzione della tensione applicata ai capi della giunzione. Conoscere la caratteristica di un dispositivo è di fondamentale importanza poichè permette di prevederne il funzionamento in un certo contesto applicativo. La caratteristica di una giunzione ideale è rappresentata in Figura 1.7 nella quale sono visibili le regioni di *Polarizzazione diretta*, *Polarizzazione Inversa* e *Breakdown*. Quest'ultima regione è caratterizzata da un brusco aumento della corrente dovuto alla presenza di un campo elettrico talmente intenso da generare coppie di portatori di carica in maniera incontrollata per *Effetto Zener* o *produzione a valanga*. Aumentando troppo la tensione di polarizzazione inversa la giunzione viene compromessa in maniera irreversibile.

L'andamento della corrente I in funzione della tensione V nelle regioni al di fuori del Breakdown in una giunzione ideale, è descritta dall'equazione di Shockley:

$$I = I_m(e^{V/\eta V_T} - 1) \quad (1.1)$$

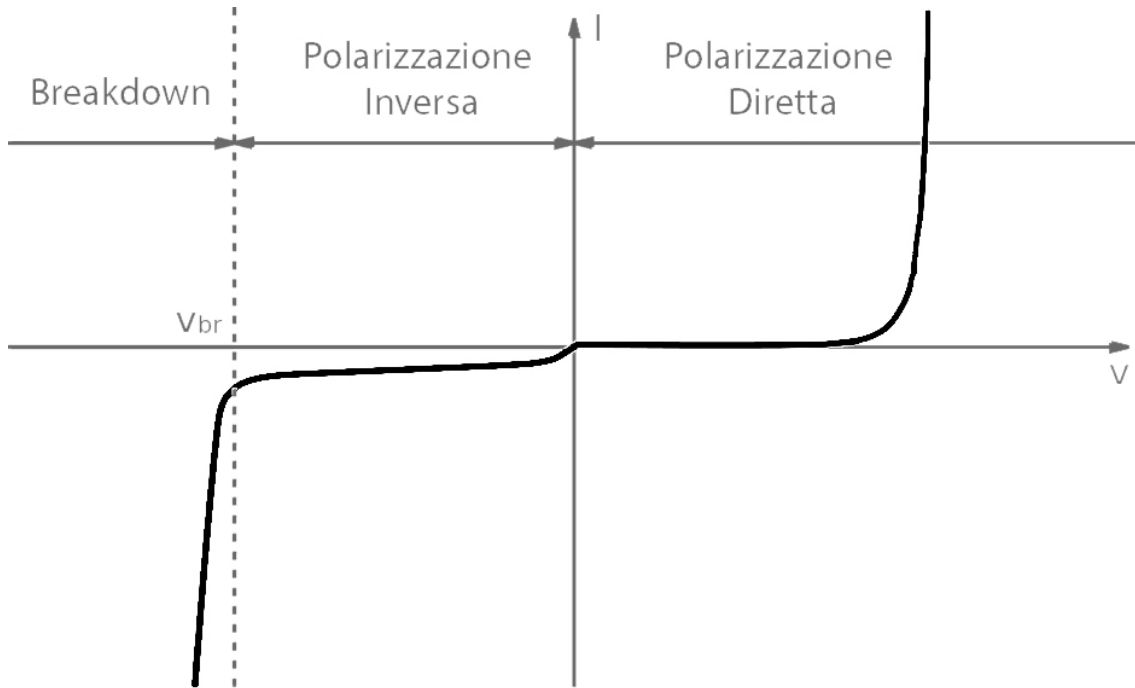


Figura 1.7: Caratteristica giunzione PN ideale

Dove I_m è la *corrente di saturazione inversa* (ossia la corrente generata dai portatori minoritari creati all'interno della giunzione), η è una costante detta *parametro di idealità* e V_T è la *tensione termica* ($25 - 26 \text{ mV}$ a 300 K).

Uno degli scopi principali di questo lavoro consiste nella misura delle caratteristiche di alcuni Ultra Fast Silicon Detectors (UFSD). Bisogna sottolineare che questi dispositivi, in quanto molto più complessi di una semplice giunzione PN, hanno delle caratteristiche che possono essere molto diverse da quella appena descritta. Tutti i dispositivi studiati lavorano in polarizzazione inversa, quindi i grafici che verranno illustrati nel Capitolo 3 sono relativi a questa regione.

1.1.6 Interazione con particelle ionizzanti

Le caratteristiche dei semiconduttori drogati e la possibilità di creare coppie elettrone-lacuna con bassissime iniezioni energetiche li rendono particolarmente adatti nell'ambito della rivelazione di particelle. Si consideri una porzione di semiconduttore drogato immerso in un campo elettrico sul quale incide una particella con una certa energia; nell'attraversare il cristallo questa cederà agli elettroni che incontra nel suo percorso una certa quantità di energia facendoli passare nella banda di conduzione. Si formeranno dunque un certo numero di coppie elettrone-lacuna che, sotto l'azione del campo elettrico, genereranno una corrente misurabile. La presenza di portatori di carica maggioritari, però, rende il processo poco efficiente a causa della rapidità

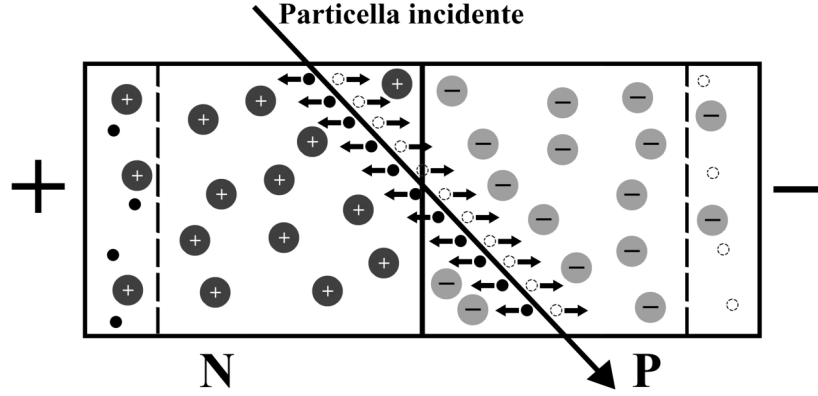


Figura 1.8: *Interazione di una particella con una giunzione polarizzata*

con cui avviene la ricombinazione. Se si utilizza invece una giunzione PN polarizzata inversamente, nella regione di svuotamento non ci sono portatori di carica maggioritari, questa può quindi essere utilizzata come zona sensibile al passaggio di una particella (Figura 1.8). L'ampiezza L della regione di svuotamento è data dalla relazione:

$$L = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) (V_d + V_b)} \quad (1.2)$$

dove ε rappresenta la permittività assoluta del semiconduttore usato, q la carica elettrica elementare, N_A ed N_D le densità di atomi accettori e donatori nei cristalli drogati, V_b la tensione applicata alla giunzione e V_d la tensione di contatto della giunzione.

Aumentando la tensione di polarizzazione inversa, aumenta la regione di svuotamento fino a che questa non occupa tutta quanta la giunzione. La tensione V' necessaria per raggiungere questa configurazione è data da:

$$V' = N_p \frac{qW^2}{2\varepsilon_0\varepsilon_r} \quad (1.3)$$

con N_p densità dei portatori di carica, ε_0 permittività del vuoto, ε_r permittività relativa del semiconduttore e W spessore della giunzione.

Il segnale in un rivelatore di questo tipo è descrivibile con il teorema di Shockley-Ramo. Nell'approssimazione di un rivelatore come condensatore a facce piane, la densità delle linee di campo sugli elettrodi dipende dalla posizione della particella. Il teorema afferma che la corrente indotta dal moto della carica q sul singolo elettrodo k è descritta da:

$$I_k(t) = -q\vec{v}(x) \cdot \vec{E}_k(x) \quad (1.4)$$

con \vec{v} velocità della carica q e \vec{E}_k campo elettrico ottenuto ponendo a 1 il potenziale

dell'elettrodo k -esimo e a 0 l'altro.

1.2 Rivelatori al silicio con guadagno

Ci concentreremo ora su una particolare famiglia di rivelatori al silicio che sfruttano la moltiplicazione a valanga per ottenere un'amplificazione interna del segnale creato dalla particella. Per far ciò il rivelatore viene sottoposto a differenze di potenziali molto alte; l'intenso campo elettrico generato accelera le cariche libere prodotte a tal punto da innescare una reazione a catena in cui queste generano altre coppie elettrone- lacuna. L'andamento della produzione di coppie è di tipo esponenziale e segue la legge:

$$N(x) = N_0 \cdot e^{\alpha x} \quad (1.5)$$

dove N_0 è il numero iniziale di coppie e α il coefficiente di ionizzazione. Possiamo quindi calcolare il guadagno G del dispositivo:

$$G = \frac{N(x)}{N_0} = e^{\alpha d} \quad (1.6)$$

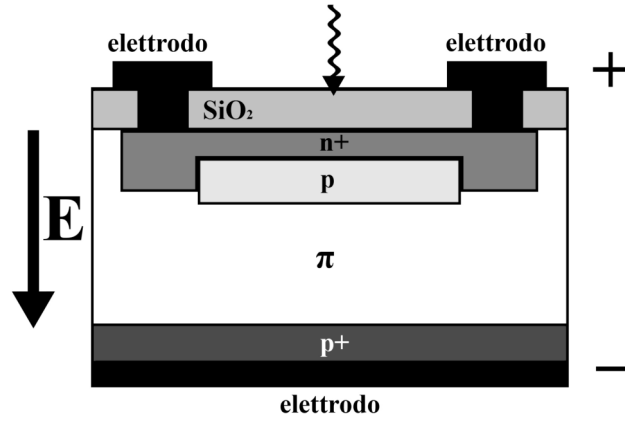
con d spessore della zona di moltiplicazione.

1.2.1 APD

L'Avalanche PhotoDiode converte in segnali elettrici i fotoni incidenti sfruttando l'effetto fotoelettrico. La sua struttura è schematizzata in Figura 1.9, esso è composto da:

- Uno strato fortemente drogato n^+
- Uno strato drogato p
- Una regione di semiconduttore intrinseco π
- Una regione fortemente drogata p^+

Il campo elettrico in prossimità della prima giunzione $n^+ - p$ è molto intenso, i fotoni che raggiungono questa zona innescano una reazione di moltiplicazione a valanga che prosegue, in maniera più controllata, nella regione π dove il campo elettrico è circa costante. I guadagni ottenuti in un APD sono dell'ordine di $10^2 - 10^3$. È importante notare che le tensioni applicate devono essere tali da non alimentare troppo il processo a valanga, ciò determinerebbe la rottura del rivelatore. Se sono necessarie

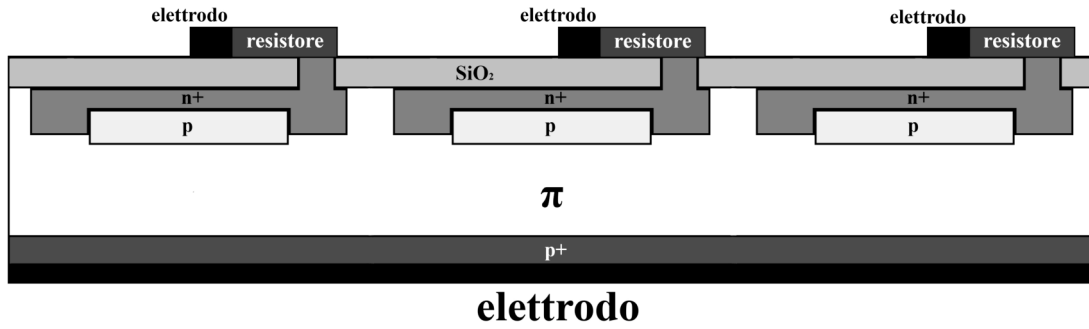
Figura 1.9: *Struttura di un APD*

amplificazioni più grandi (circa 10^4) possono essere sfruttate alcune tecniche di contenimento del processo a valanga; un dispositivo di questo tipo funziona in quella che viene detta ‘modalità Geiger’.

1.2.2 SiPM

Questo dispositivo è composto da una matrice di APD che operano in modalità Geiger messi singolarmente in serie con una resistenza e montati in parallelo fra loro su uno stesso substrato di silicio (Figura 1.10) con una densità di $10 - 10000 \frac{\text{pixels}}{\text{mm}^2}$. Il segnale risultante è quindi la somma di tutti i segnali ricevuti dai singoli APD. Dimensioni tipiche di questi rivelatori sono di qualche mm e hanno uno spessore di circa $300\mu\text{m}$. Questo ridotto spessore garantisce una scarica Geiger rapida ($< 500\text{ps}$) rendendo questo rivelatore particolarmente adatto in applicazioni che richiedono elevate risoluzioni temporali. Il guadagno che si ottiene con questi rivelatori è di $10^5 - 10^7$, non necessitano dunque di amplificazione. Per come sono costruiti, questi rivelatori perdono del segnale a causa della regione non sensibile fra un APD e gli adiacenti.

Quando un fotone entra nel singolo APD innesca un processo a valanga poi interrotto grazie alla presenza della resistenza in serie per permettere la rivelazione successiva. Questo processo è però caratterizzato da un tempo morto di $3 \div 20\text{ns}$. Ciò impedisce l'utilizzo di SiPM come contatori di singole particelle in applicazioni ad alto rate; inoltre il guadagno ottenuto è troppo elevato per applicazioni con segnali molto energetici e il rumore termico è proporzionale all'area del rivelatore.


 Figura 1.10: *Struttura di un SiPM*

1.2.3 LGAD

I Low Gain Avalanche Detector rappresentano una buona soluzione ai problemi riscontrati sopra. Hanno una struttura simile ai SiPM con l'aggiunta di uno strato drogato opportunamente per controllare il processo a valanga. Come risultato si ha un guadagno molto ridotto rispetto ai rivelatori precedenti che è di circa 10.

1.3 Ultra Fast Silicon Detector

Nell'ottica di realizzare rivelatori con altissime risoluzioni spaziali e temporali ($10 \div 20 \mu m$ e $10 \div 20 ps$) un particolare tipo di LGAD è rappresentato dall' Ultra Fast Silicon Detector proposto per la prima volta nel 2014 dalla CNM (Centro Nacional de Microelectronica, in Barcelona, Spain). La struttura di questo tipo di LGAD è descritta in Figura 1.11. La Junction Termination Extension (JTE) di tipo n serve ad attenuare gli effetti di bordo e garantisce un campo elettrico interno uniforme.

1.3.1 Spessore

Il principale requisito di un UFSD è legato allo spessore; per avere un'ottima risoluzione temporale, infatti, è necessario ridurre al minimo il tempo di raccolta della carica: se si applicano tensioni molto alte le cariche generate si muoveranno alla velocità di deriva in saturazione e quindi il tempo di raccolta della carica diventa funzione della sola distanza percorsa dalle cariche stesse. Strutture troppo sottili, però, portano a guadagni molto bassi, inoltre si assiste ad un aumento della capacità che influisce molto sul rumore (che può addirittura nascondere il segnale). Bisogna dunque progettare il rivelatore tenendo conto di queste limitazioni. Nella Tabella 1.1 sono elencate alcune caratteristiche simulate di rivelatori UFSD a pixel in funzione dello spessore.

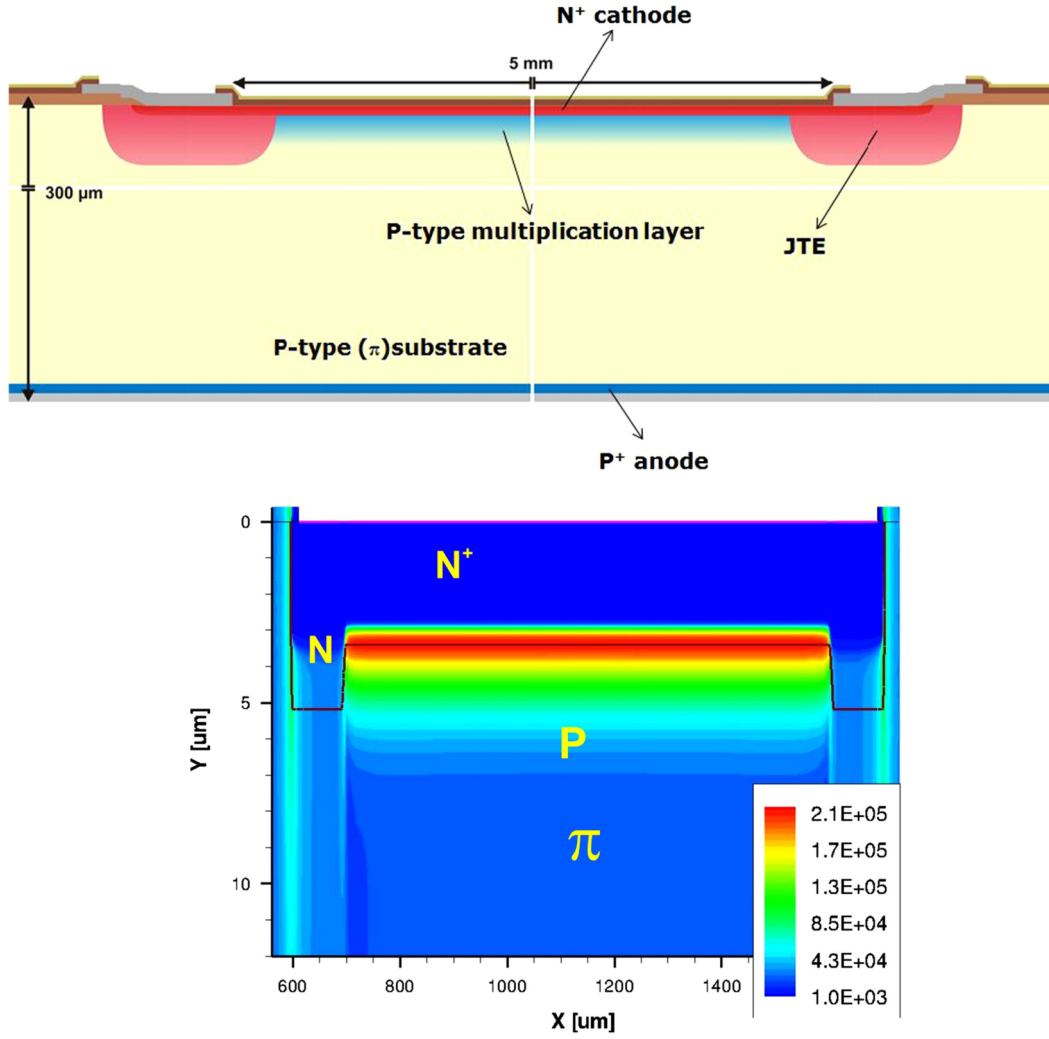


Figura 1.11: *Struttura di un UFSD e campo elettrico simulato al suo interno*

| Spessore (μm) | Capacità (fF) | T rac. (ps) | G. 2000 e^- |
|----------------------|---------------|-------------|---------------|
| 1 | 250 | 13 | 57 |
| 2 | 125 | 25 | 25 |
| 5 | 50 | 63 | 8.5 |
| 10 | 25 | 125 | 3.8 |
| 20 | 13 | 250 | 1.7 |
| 100 | 3 | 1250 | 0.29 |
| 300 | 1 | 3750 | 0.09 |

Tabella 1.1: *Caratteristiche di alcuni UFSD simulati. Le colonne indicano rispettivamente: spessore del pixel, capacità, tempo di raccolta e guadagno necessario per visualizzare il segnale*

1.3.2 Risoluzione temporale

Il singolo pixel di UFSD è letto da un preamplificatore posto molto vicino ad esso, il segnale di uscita è quindi comparato con una soglia stabilita per determinare il tempo di arrivo. La risoluzione temporale σ_t è determinata da tre fattori:

$$\sigma_t^2 = \sigma_{TDC}^2 + \sigma_{TW}^2 + \sigma_J^2 \quad (1.7)$$

che si riferiscono rispettivamente al *timetodigitalconverter* (TDC), *timewalk* (TW) e *jitter* (J). Il *TDC* introduce un'incertezza fissata di

$$\sigma_{TDC} = \frac{TDC_{bin}}{\sqrt{12}} \quad (1.8)$$

dove TDC_{bin} è la larghezza in tempo del bit meno significativo, considerandola dell'ordine di $20ps$ allora questo termine non risulta importante. Quando si parla di *timewalk* ci si riferisce al tempo che il segnale creato impiega per superare la soglia stabilita. Segnali di ampiezza diversa superano la soglia in istanti diversi. Se il segnale si assume lineare, con tempo di salita t_r e ampiezza S , il ritardo t_d dovuto al *timewalk* si scrive:

$$t_d = \frac{t_r V_0}{S} \quad (1.9)$$

con V_0 tensione di soglia. L'errore associato σ_{TW} è quindi dato dalla RMS dei t_d :

$$\sigma_{TW} = [t_d]_{RMS} \quad (1.10)$$

il termine di *jitter* è invece dovuto alla presenza del rumore elettronico. Quando il segnale è in salita, il comparatore di soglia può scattare in anticipo o in ritardo a seconda di come agisce il rumore in quel punto. σ_J è quindi direttamente proporzionale al rumore N e inversamente proporzionale alla pendenza del segnale nei pressi del valore di soglia:

$$\sigma_J = \frac{N}{dV/dt} \quad (1.11)$$

Gli attuali sensori UFSD realizzati hanno dimensioni nell'ordine del mm e risoluzioni temporali misurate di $35 \div 50$ ps (si veda ad esempio lo studio di Francesca Carnesecchi [2]).

1.3.3 Applicazioni

Le elevate risoluzioni spaziali e temporali degli UFSD, oltre che negli esperimenti ad alte energie, avrebbero applicazione immediata in diversi contesti commerciali.

La risoluzione temporale di 10 ps rappresenterebbe un miglioramento di un ordine di grandezza nella precisione rispetto agli attuali rivelatori. Alcuni esempi rivelanti di applicazione sono:

- PET: la tomografia ad emissione di positroni è uno dei sistemi più potenti per sondare la fisiologia umana. È uno strumento diagnostico utilizzato nella prevenzione del cancro grazie alla capacità di individuare modifiche nei tessuti. Migliorare la precisione spaziale e temporale di un fattore 10, permetterebbe di ridurre il rumore presente nella misura nonché le dosi di radiofarmaci al paziente.
- Identificazione di particelle nello spazio: diversi esperimenti sono stati montati su satelliti o stazioni spaziali con lo scopo di misurare particelle cariche al di fuori dell'atmosfera. Un esempio è rappresentato dall' AMS detector (Alpha Magnetic Spectrometer) che opera a bordo dell' ISS dal 2011 misurando con altissima precisione la composizione dei raggi cosmici e il loro flusso. La quantità di moto delle particelle è misurata con dei sensori al silicio ad alta risoluzione all'interno di un campo magnetico di circa 1 m di lunghezza. La risoluzione temporale di un UFSD di 10 ps, permetterebbe di trovare il "Sacro Graal" della fisica dei raggi cosmici: la distinzione fra ioni di anti-carbonio e anti-protoni, fino ad impulsi di 200 GeV/c.
- Visione robotica e 3D: Con il diffondersi di tecnologie come la robotica domestica o la stampa 3D, si cerca di rendere sempre più efficienti i dispositivi alla base del funzionamento di queste tecnologie. Questi strumenti necessitano infatti di misure molto precise di distanza che vengono effettuate registrando il tempo di volo di impulsi laser con una certa frequenza. L'utilizzo di UFSD come rivelatori, permetterebbe di ottenere ricostruzioni tridimensionali molto più precise e rapide, poichè si potrebbe aumentare la frequenza degli impulsi utilizzati e il sensore sarebbe comunque capace di distinguere segnali di ritorno separati.

Capitolo 2

Setup sperimentale

Gli obiettivi principali di questo lavoro sono due: realizzare un programma per automatizzare la realizzazione delle curve I-V dei rivelatori UFSD a disposizione e studiare il segnale di una matrice 2 x 2 di UFSD eseguendo due scansioni (una verticale e una orizzontale) utilizzando un fascio laser opportunamente ridotto. In questo capitolo verranno brevemente illustrati gli strumenti di misura utilizzati, i rivelatori studiati e i programmi realizzati per effettuare le misure.

2.1 Rivelatori analizzati e strumenti di misura

Le caratteristiche I-V degli UFSD sono state realizzate utilizzando l'apparato sperimentale descritto schematicamente in Figura 2.1. I sensori sono stati chiusi all'interno di una scatola nera e opportunamente collegati agli strumenti di misura. Una resistenza da 22 k Ω è stata inserita per proteggere il picoamperometro da picchi di corrente.

2.1.1 Rivelatori UFSD utilizzati

In questo lavoro sono stati studiati 7 rivelatori singoli (Figura 2.2) e 1 matrice 2 x 2 di UFSD (Figura 2.3). Alcune delle loro caratteristiche sono riassunte in Tabella 2.1. Il nome utilizzato per identificarli è legato alla produzione e si è deciso di mantenerlo per facilitare il confronto con passate e future analisi sugli stessi.

Tutti i rivelatori analizzati sono dotati di strato di guadagno ad eccezione del rivelatore A che è caratterizzato da una semplice giunzione P-in-N (regione P e N separata da uno strato a concentrazione intrinseca).

I rivelatori A, B e C sono stati prodotti dall'azienda CNM (Centro Nacional de Microelectrónica, Barcellona) mentre i successivi da FBK (Fondazione Bruno

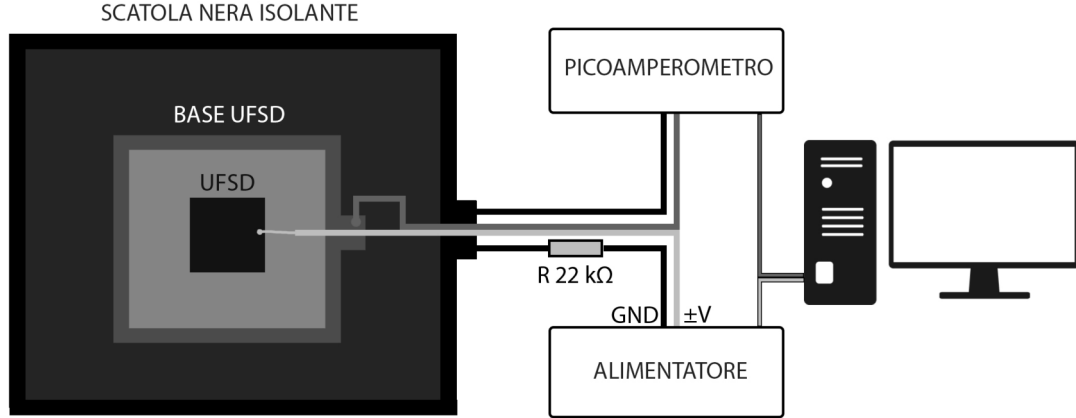


Figura 2.1: *Schema dell'apparato di misura utilizzato per realizzare le curve I-V*

Kessler, Trento). Tutti quanti sono stati ottenuti dal taglio ed eventuale assottigliamento di wafer; successivamente sono stati incollati e opportunamente bondati su supporti di vario tipo.

Per come sono realizzati, i rivelatori A e B sono stati alimentati in tensione positiva, tutti gli altri in tensione negativa. Si sottolinea, inoltre, che i rivelatori H, D0 e D1 sono costituiti da 2 pixel ma solo uno dei due è alimentato, il secondo risulta quindi spento.

| ID rivelatore | Produzione | Area attiva (mm^2) | Spessore (μm) |
|---------------|------------|------------------------|----------------------|
| A | CNM | 5x5 | 300 |
| B | CNM | 5x5 | 300 |
| C | CNM | 5x5 | 300 |
| D0 | FBK | 3x3 | 300 |
| D1 | FBK | 2x2 | 300 |
| E | FBK | 1,2x1,2 | 50 |
| H | FBK | 1x1 | 50 |
| matrice 2x2 | FBK | 4x(2x2) | 50 |

Tabella 2.1: *Caratteristiche rivelatori UFSD utilizzati*

2.1.2 Alimentatore rivelatori

Per alimentare gli Ultra Fast Silicon Detector analizzati, si è utilizzato l'alimentatore CAEN N1470 (Figura 2.4). Le sue specifiche sono riportate in Appendice A; come si può notare questo strumento ha un ampio range di lavoro (0-8000V) inoltre

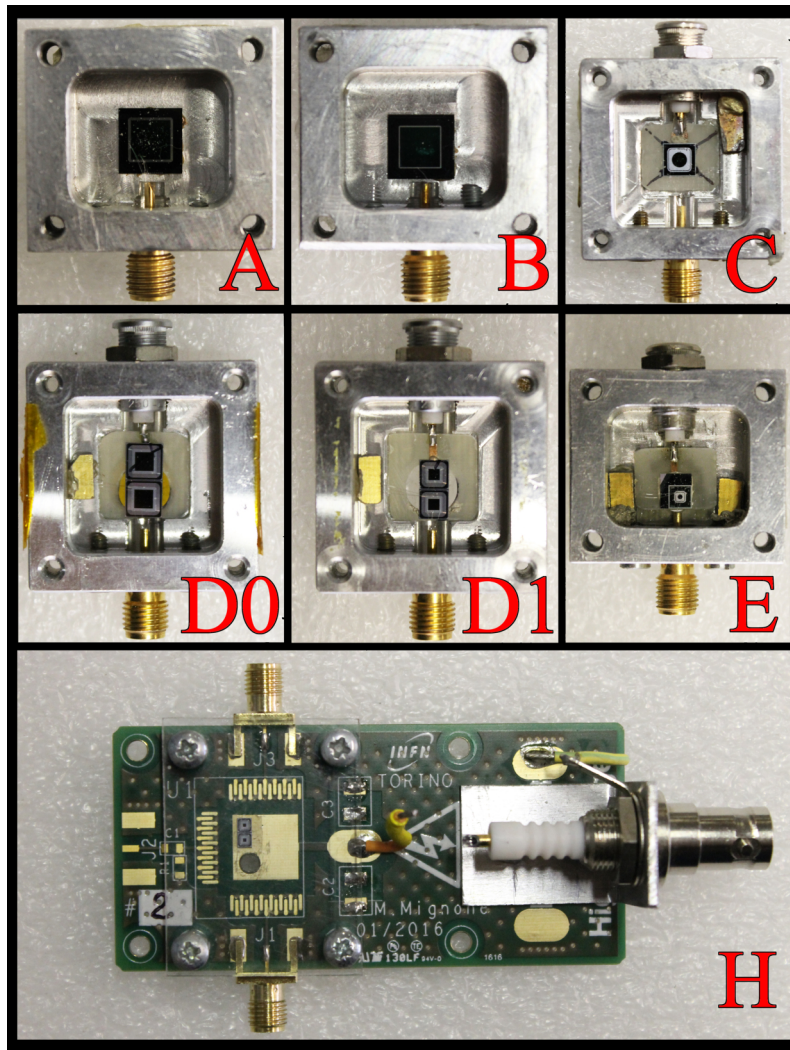


Figura 2.2: Rivelatori UFSD utilizzati

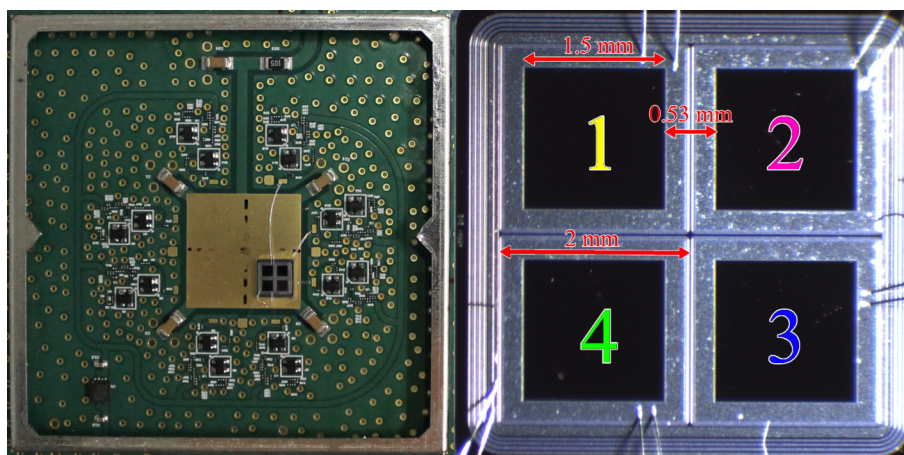


Figura 2.3: Matrice 2×2 UFSD. A sinistra è visibile l'elettronica di amplificazione dei 4 UFSD. A destra un dettaglio al microscopio di questi.



Figura 2.4: Alimentatore CAEN N1470

è predisposto per essere facilmente gestito in remoto. Si è infatti utilizzato per controllarlo un programma sviluppato da Daniele Cavazza il cui front panel è riportato in Figura 2.5.

L'alimentatore ha 4 differenti uscite, le prime due a partire dall'alto sono state predisposte per fornire tensioni positive, le ultime due tensioni negative. Vengono di seguito descritte le funzionalità delle varie sezioni del programma:

- *VMAX* : Tensione massima (in valore assoluto) che l'uscita può erogare.
- *ISET* : Corrente massima permessa.
- *RAMPUP* e *RAMPDOWN* : velocità di salita e discesa al variare della tensione.
- *TRIPTIME* : tempo tollerato dall'alimentatore con una corrente maggiore di quella impostata (*ISET*) prima di scendere in tensione con la modalità impostata (nel nostro caso *RAMPDOWN*)
- *VSET* : Tensione erogata.
- *Voltage*, *Current* e *Power*: tensione-corrente misurate e potenza calcolata.

2.1.3 Amplificatore matrice

La matrice 2 x 2 di UFSD analizzata produce segnali di tensione molto piccoli. Per questo essa è stata montata su una scheda elettronica che contiene 4 amplificatori, uno per ogni UFSD. L'amplificazione è posizionata molto vicina alla matrice per evitare che il rumore alteri il segnale prima che questo venga amplificato (Figura 2.3). Gli amplificatori sono stati alimentati con una tensione di 3.5 V erogata dall'alimentatore TTi EX354T.

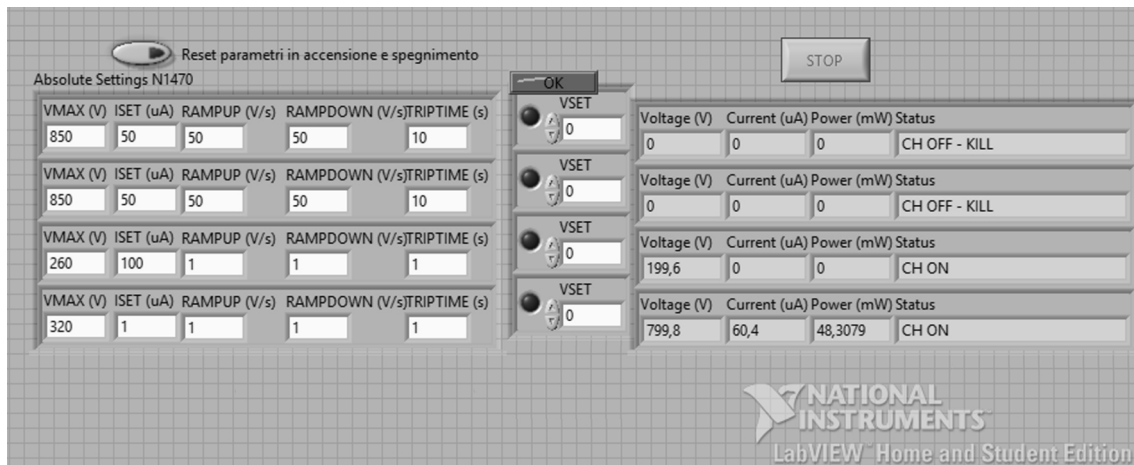


Figura 2.5: *Front panel Alimentatore UFSD*

2.1.4 Picoamperometro

Le correnti degli UFSD misurate sono dell'ordine di $10^{-12} \div 10^{-6}$ A. A tale scopo è stato utilizzato il picoamperometro Keithley 6487 (Figura 2.6) le cui caratteristiche sono riportate in Appendice B.

Questo, insieme all'alimentatore CAEN, è stato gestito da un programma LabVIEW progettato nella fase preliminare di questo lavoro di tesi (il cui funzionamento verrà illustrato successivamente) al fine di realizzare precise misure di corrente utili nella caratterizzazione degli UFSD. Per proteggere lo strumento sono state prese opportune precauzioni: non si è mai superata la tensione di alimentazione di 500 V, ed è stata inserita una opportuna resistenza in serie per bloccare eventuali picchi di corrente.

2.1.5 Fonte laser

La fonte laser utilizzata per le scansioni sulla matrice, è stata generata da una testina Pil036X gestita dal controller EIG2000DX (Figura 2.7) le cui specifiche sono

riportate in Appendice C. La lunghezza d'onda prodotta è di 1057 nm e la potenza del fascio di 1 W . Per effettuare le misure è stata emessa una pulsazione laser con una frequenza di 100 Hz con un'attenuazione dello 0% in potenza.

Il fascio è stato portato all'interno della scatola nera nella quale sono state fatte le misure utilizzando una fibra ottica. Per gli scopi delle misure era necessario ottenere lo spot più piccolo possibile, per fare ciò si è utilizzato un sistema ottico composto da un collimatore e un diaframma, mostrati in Figura 2.8. L'uscita *TRIG OUT 5V* del controller è stata utilizzata per fornire il trigger all'oscilloscopio.

2.1.6 Oscilloscopio

L'oscilloscopio utilizzato per la caratterizzazione della matrice è un Lecroy 6100A Wave Runner (Figura 2.9). Ognuno dei 4 canali di ingresso è stato utilizzato per effettuare le misure su un singolo pixel della matrice. L'impedenza di ingresso dello strumento è di $50\ \Omega$. Questo è stato utilizzato con trigger esterno proveniente dal controller del laser.

2.1.7 Movimentatore

Per effettuare le scansioni con la matrice di UFSD è stato utilizzato un movimentatore micrometrico costituito da un coppia di motori stepper Standa 8MT167-25 gestiti dal motor controller Standa 8SMC5-USB-B9-2; le specifiche sono riportate in Appendice D. Il sistema è stato montato in maniera da avere un piano verticale perpendicolare al fascio laser, con la possibilità di effettuare movimenti micrometrici su entrambi gli assi; la combinazione dei movimenti garantisce il posizionamento su una superficie di circa $25 \times 25\text{ mm}^2$ (Figura 2.10). La coppia controller-motori determina una risoluzione massima di $0,625\ \mu\text{m}$, più che sufficiente per gli scopi di questo studio.

2.2 Programmi LabVIEW realizzati

Tutte le misure effettuate sono state realizzate con LabVIEW per rendere più efficienti e rapide le mie e le future acquisizioni. Ho realizzato due programmi: uno per la realizzazione delle curve I-V, l'altro per il controllo del movimentatore con la possibilità di avere a schermo una rappresentazione in tempo reale della posizione assoluta raggiunta dai motori stepper. Quest'ultimo programma, può essere visto come l'evoluzione del precedente sistema di controllo realizzato da Elena Fini [7] nell'ambito del suo lavoro di tesi triennale.



Figura 2.6: *Picoamperometro Keithley 6487*

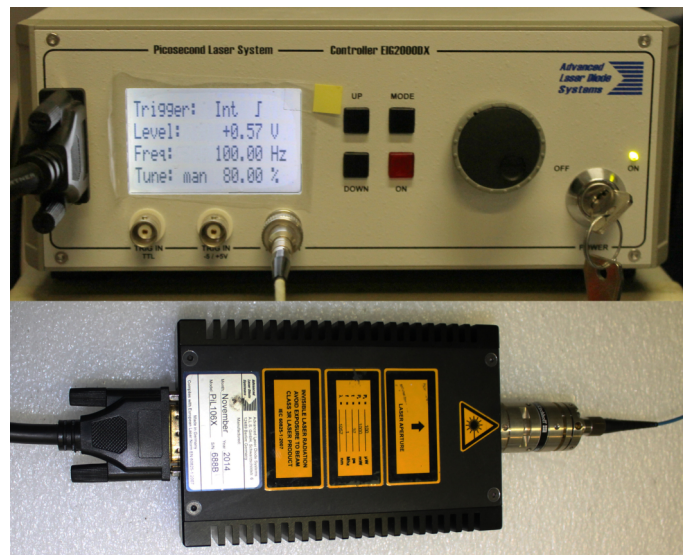


Figura 2.7: *Controller e testina laser*

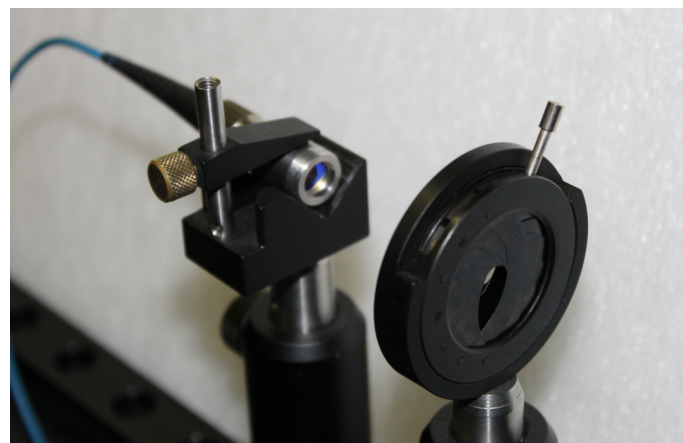


Figura 2.8: *Sistema ottico di gestione del fascio*

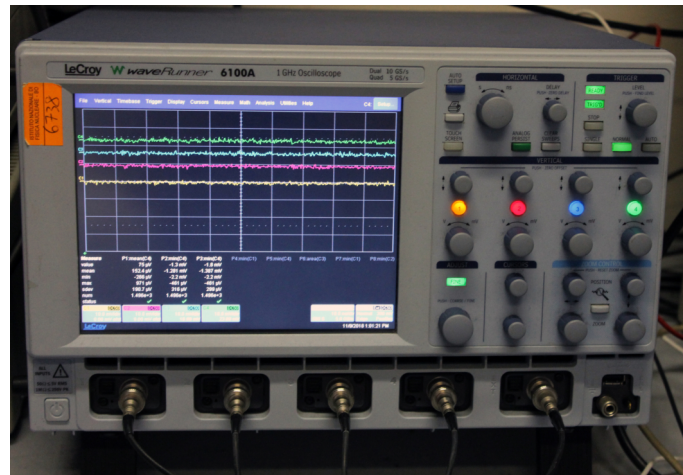


Figura 2.9: *Oscilloscopio Lecroy 6100A*



Figura 2.10: *Motori stepper e motor controller Standa*

2.2.1 Misura della caratteristica I-V

Questo programma è stato studiato per essere utilizzato non solo nell'ambito di questo lavoro ma per la misura della caratteristica I-V di qualunque oggetto nei limiti di tolleranza corrente-tensione degli strumenti che si interfacciano con esso: alimentatore CAEN N1470 e picoamperometro Keithley 6487.

La parte del programma che si occupa della gestione dell'alimentatore è la stessa già illustrata in Figura 2.5; a questa ne è stata aggiunta una seconda per il controllo della misura della caratteristica I-V e la sua rappresentazione grafica. Il pannello frontale di quest'ultima parte è riportato in Figura 2.11, di seguito se ne illustra il funzionamento:

Prima di avviare il programma:

- 1) realizzato l'opportuno circuito di misura, impostare l'alimentatore nella parte

alta del programma (Figura 2.5). Non cambiare il valore di *VSET* ma attivare il canale che si intende utilizzare tramite l'apposita spia verde.

2) In *Seleziona linea attiva* scegliere il canale con il quale si intende effettuare le misure.

3) impostare:

- *Tensione di partenza*: tensione dalla quale si vogliono iniziare le misure.

- *Cambia tensione di*: differenza di tensione fra 2 punti consecutivi, un valore negativo imposta automaticamente una rampa in discesa.

- *Tensione minima* e *Tensione massima*: tensioni limite oltre le quali il programma va in *Pausa*, la *VMAX* impostata precedentemente ha la priorità.

- *Pausa dopo nuovo valore di tensione*: tempo che il programma attende prima di acquisire il dato di corrente una volta raggiunto un nuovo valore di tensione.

- *Numero massimo di grafici*: limita il numero di grafici che si intende visualizzare nello *Storico*.

Avviare il programma

il programma si porterà automaticamente alla *tensione di partenza*, successivamente, se non ci sono errori, si attiverà *PAUSA* per permettere, tramite l'apposito pulsante, l'acquisizione di un eventuale *Offset* di corrente che verrà sottratto a tutte le misure successive. Fatto ciò, spento il pulsante *PAUSA*, l'acquisizione dati procederà secondo i criteri impostati. Il programma, in maniera iterativa fino al limite superiore o inferiore impostati: cambia automaticamente la tensione, attende il tempo *Pausa dopo nuovo valore di tensione*, acquisisce il valore di corrente e disegna un punto nel grafico *Attuale*.

Premendo sul pulsante *FINE SERIE*. Il grafico *Attuale* verrà memorizzato nel grafico *Storico* e gli verrà attribuita l'etichetta *Nome serie* attuale. Non bisogna premere il pulsante *FINE SERIE* più volte se il sistema è in *PAUSA*.

Quando si raggiunge un limite compare il messaggio "*Tensione massima/minima Raggiunta Il sistema è in pausa*" impostare i nuovi valori di tensione massima/minima e/o cambiare andamento della rampa impostando un segno diverso in *Cambia tensione di*, successivamente spegnere il pulsante *PAUSA* per continuare la presa dati.

Durante tutta l'acquisizione, un andamento della corrente assoluta misurata (senza eventuali offset) in funzione del tempo, è mostrato nel grafico *Andamento corrente*. Si è ritenuto utile inserire questo ulteriore grafico per valutare l'andamento della corrente anche mentre l'acquisizione è in *PAUSA*.

Quando si intende uscire dall'esecuzione, premere il pulsante *SPEGNI*. I grafici resteranno memorizzati fino al prossimo avvio, per esportare i dati è sufficiente

2.2. Programmi LabVIEW realizzati

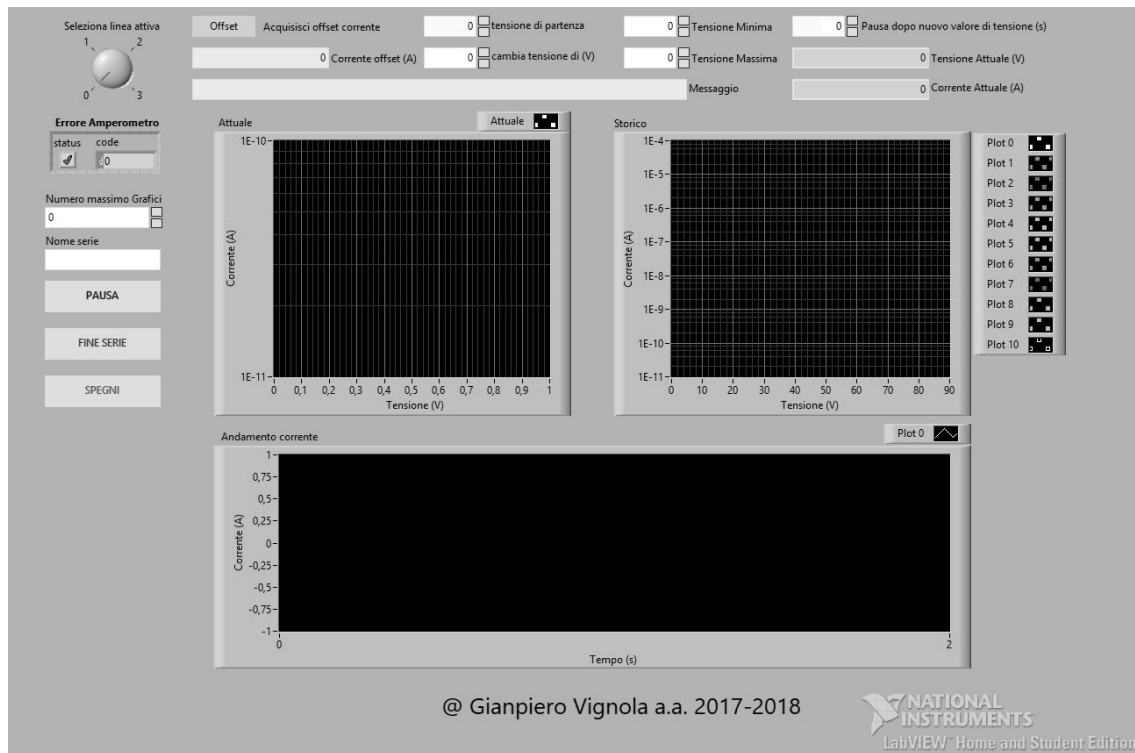


Figura 2.11: Programma per la realizzazione della caratteristica

premere con il tasto destro su di essi e utilizzare gli opportuni comandi.

2.2.2 Controllo movimentatore con feedback posizione

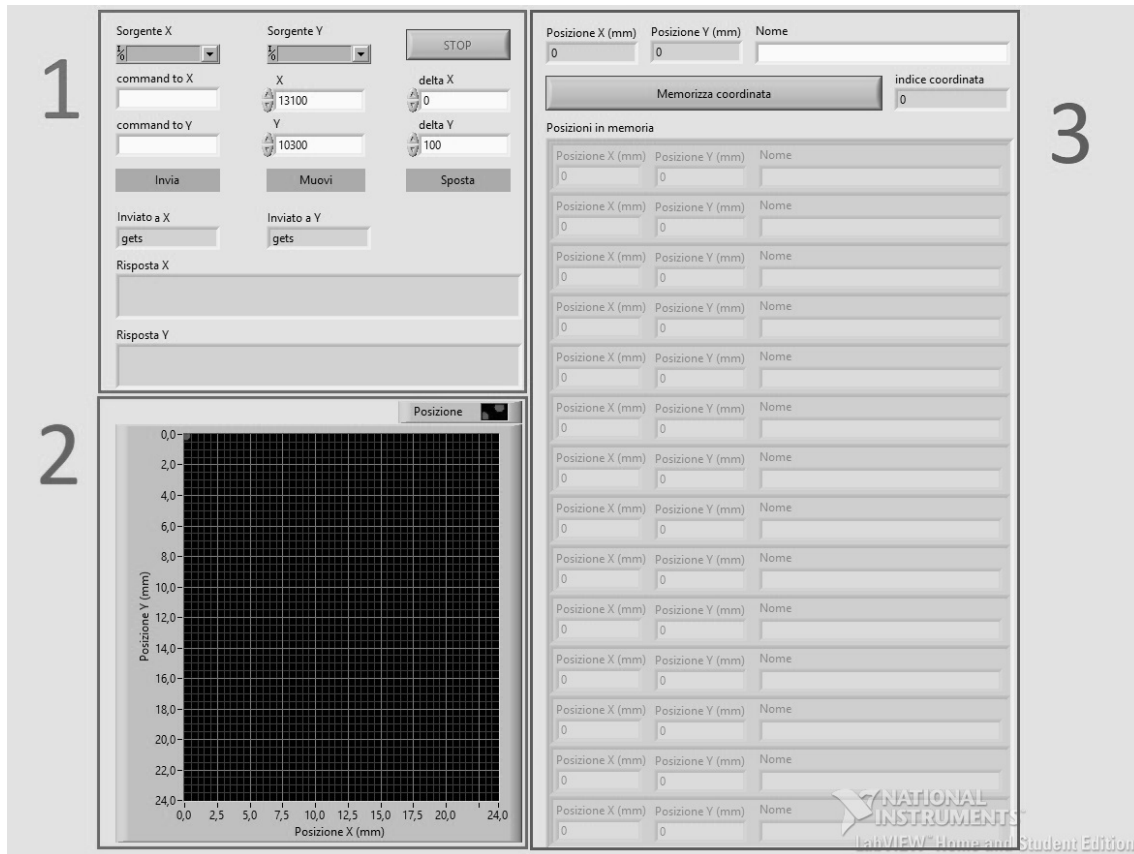
Il pannello frontale del programma che si occupa di gestire il movimentatore è mostrato in Figura 2.12.

Di seguito si illustrano brevemente le tre sezioni evidenziate nella Figura:

- Sezione 1: tramite i menù in *Sorgente X* e *Sorgente Y* si devono impostare le porte seriali *COM..* tramite le quali avviene la comunicazione con il controller. Fatto ciò è possibile inviare ai motori un comando scrivendolo negli appositi spazi e premendo il pulsante *Invia*. Esempi di comandi sono *home*, questo comando riporta entrambi i motori nella posizione di partenza (fine della corsa); *zero*, comando che indica la posizione attuale come quella di coordinata (0, 0).

Tramite il Pulsante *Muovi* si indica al controller di posizionarsi nelle coordinate *X* e *Y* indicate, mentre con il pulsante *Sposta* si esegue un salto nelle coordinate di *delta X* e *delta Y*.

Un feedback visivo dei comandi inviati e delle risposte ricevute sono visualizzati nei riquadri *Inviato a X*, *Inviato a Y*, *Risposta X* e *Risposta Y*.


 Figura 2.12: *Programma di gestione del movimentatore*

Il pulsante *STOP* va premuto solo se si intende terminare la sessione.

- Sezione 2: questa è costituita da un grafico XY con un unico punto rosso che indica la posizione assoluta dei motori. Nonostante la corsa sia di circa 25mm si è deciso di rappresentare un'area di $24 \times 24\text{mm}^2$ in maniera da suggerire all'utilizzatore di non superare tali limiti. In tal modo non si rischia di raggiungere la fine della corsa dei motori e di scalibrare il posizionamento.
- Sezione 3: qui è possibile vedere la *Posizione X* e la *Posizione Y* assoluta dei motori. Premendo sul pulsante *Memorizza coordinata*, nella tabella sottostante verranno salvate le coordinate assolute dei motori alle quali verrà assegnato il nome scritto in quel momento nella casella *Nome*. Si è deciso di inserire tale opzione poichè potrebbe tornare utile durante la sessione di misure tornare in un punto specifico.

Dato che la posizione è strettamente correlata alla calibrazione fatta, la tabella verrà automaticamente svuotata ogni volta che si avvia il programma.

2.2.3 Block Diagrams

Il Block Diagram del programma per la realizzazione della Caratteristica I-V è riportato nelle Figure 2.13, 2.14. Questo è caratterizzato da una Flat Sequence con due blocchi principali. Il primo (Figura 2.13) si occupa di portare la tensione all'opportuno valore dal quale si intende iniziare la caratterizzazione; il secondo blocco esegue in maniera continua i 4 While Loop identificati con le lettere A, B, C e D in Figura 2.14 che svolgono rispettivamente le seguenti funzioni:

- Ciclo A: questa parte di programma si occupa di aggiornare costantemente la tensione fornita dall'alimentatore, cambiandola quando altre parti del programma lo richiedono.
- Ciclo B: ogni 10 ms recupera dal picoamperometro la corrente misurata. Agendo su questa parte del programma si potrebbe sostituire il picoamperometro utilizzato con altri strumenti: amperometri con range di misura più estesi, misuratori di Capacità per la realizzazione di curve C-V, ecc.
- Ciclo C: questa piccola porzione di programma si occupa di mostrare la corrente misurata durante tutta l'esecuzione (viene disegnato un nuovo punto ogni 200 ms).
- Ciclo D: è il cuore del programma, gestisce i grafici delle caratteristiche, controlla se sono stati raggiunti i limiti e aggiorna la tensione di alimentazione seguendo i criteri impostati.

Tutta la parte che si occupa della gestione dell'alimentatore è stata realizzata utilizzando il programma di Daniele Cavazza.

La struttura del programma per il controllo del movimentatore è invece riportata in Figura 2.15. All'interno di un While Loop è inserita una Flat Sequence con due Blocchi. Nel primo una Event Structure genera il comando da mandare al movimentatore attivando la relativa sezione quando un pulsante nel Front Panel viene premuto (in questa parte sono stati riutilizzate parti prese dal programma di Elena Fini). Nel secondo Blocco, in una ulteriore Flat Sequence annidata, il comando generato viene inviato al movimentatore che lo elabora e produce una risposta, se il comando era un "gets" allora dalla risposta del movimentatore viene estratta la posizione attuale raggiunta dai motori che viene quindi trasformata in una coordinata rappresentata da uno spot rosso in un grafico XY. La parte selezionata in azzurro nella figura si occupa, invece, di aggiungere alla matrice "Posizioni in memoria" un nuovo elemento ogni volta che viene premuto il pulsante "Memorizza Coordinata".

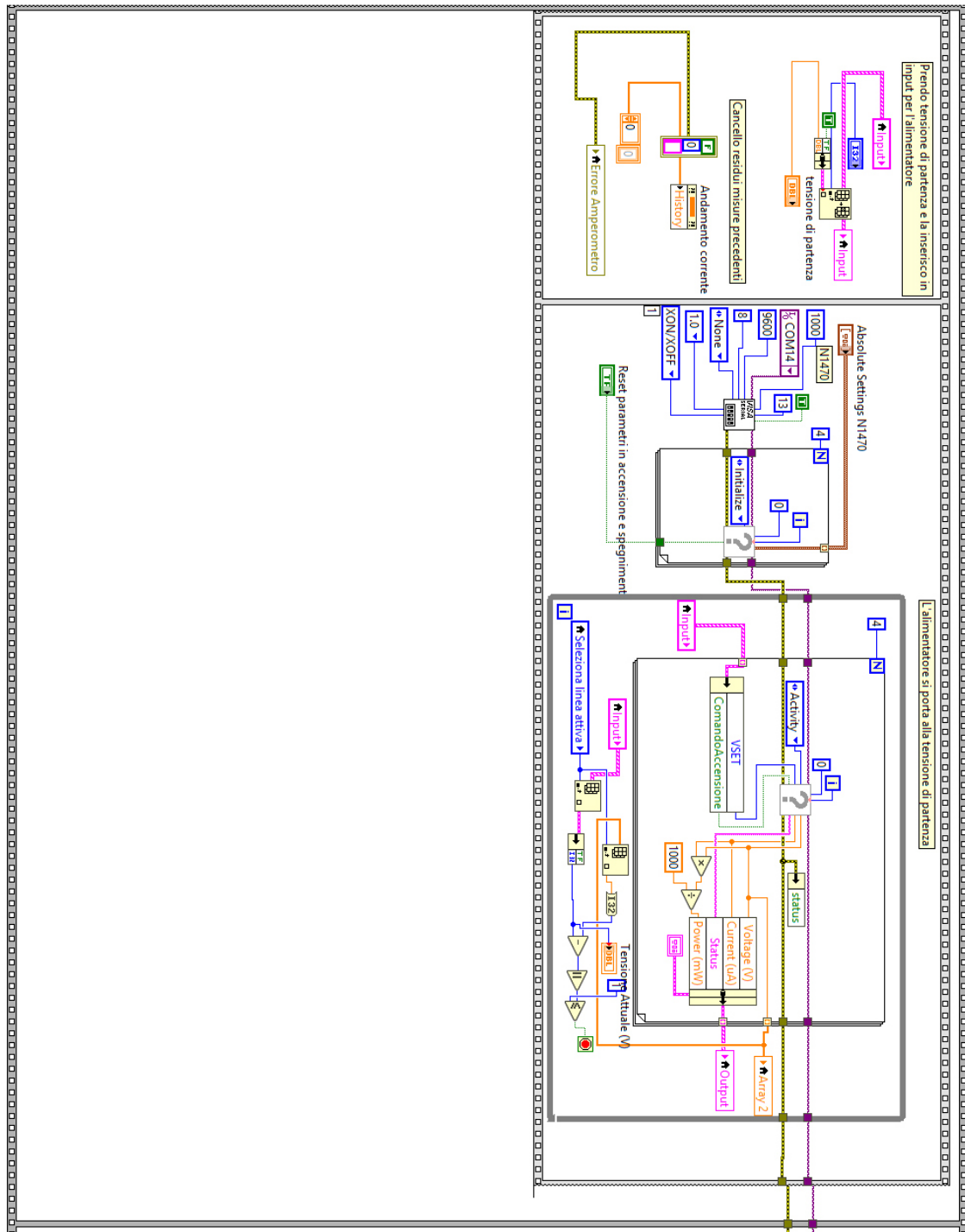


Figura 2.13: *Block Diagram* programma per la realizzazione della caratteristica, Parte 1

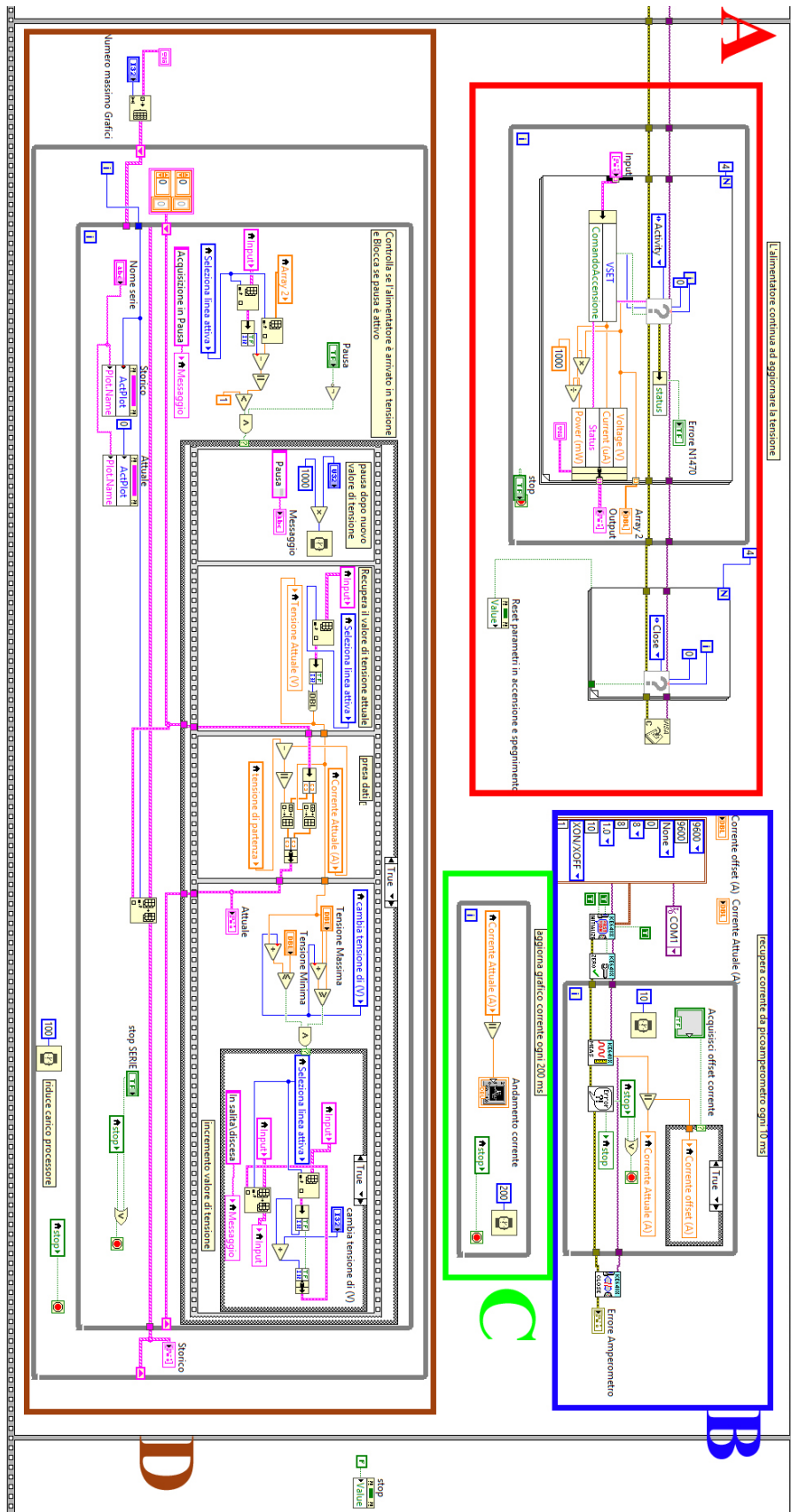


Figura 2.14: Block Diagram programma per la realizzazione della caratteristica, Parte 2

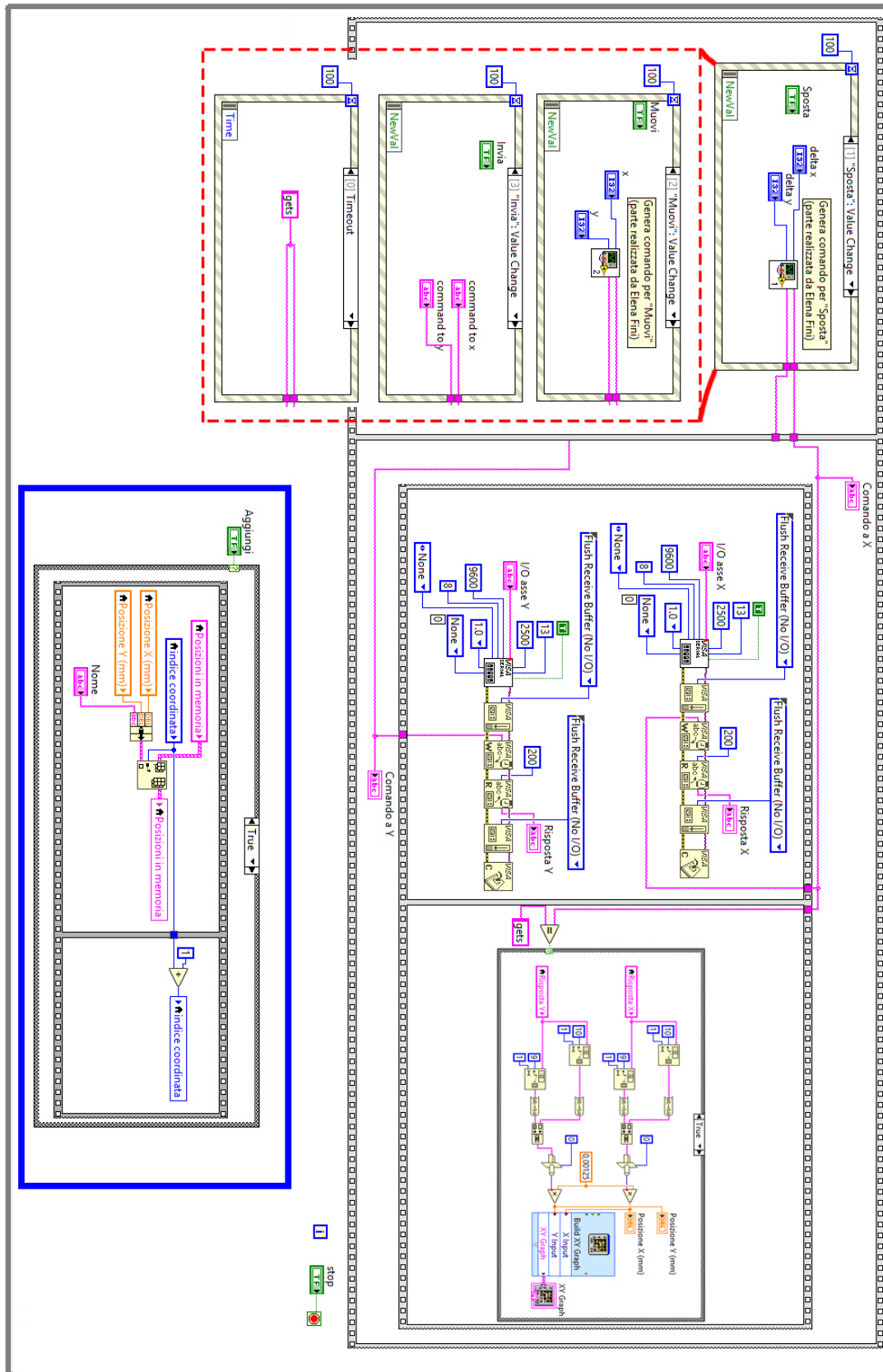


Figura 2.15: Block Diagram programma per la gestione del movimentatore

Capitolo 3

Risultati e Analisi

3.1 Caratteristiche I-V

Nella realizzazione delle caratteristiche I-V si è utilizzato il picoamperometro Keithley 6487 il quale tollera al più 20 mA in corrente e 505 V in tensione. Per proteggere lo strumento, dunque, è stata inserita, in maniera opportuna nel circuito di misura, una resistenza da $22\text{ k}\Omega$ e non si è alimentato mai con tensioni superiori a 500 V . Per questo motivo solamente per 2 rivelatori è stato possibile osservare la zona di breakdown (D0 ed H).

Nei grafici che seguono, si è deciso di non riportare le bande di errore; tuttavia questi possono essere valutati per ogni punto seguendo le specifiche degli strumenti utilizzati riportate in appendice. Si è inoltre utilizzata la convenzione di rappresentare correnti e tensioni in valore assoluto nonostante nella maggior parte dei casi si avesse a che fare con valori negativi.

Per ogni rivelatore sono state realizzate curve I-V con tensione in salita e in discesa per valutarne eventuali discrepanze. Tutte le caratteristiche sono state effettuate con il programma precedentemente illustrato dove è stata impostata una *Pausa dopo nuovo valore di tensione* di 2 s . Si osservi che ad ogni misura di corrente è stato rimosso un offset acquisito alla tensione di 0 V .

Segue una breve analisi delle curve I-V ottenute con relativi grafici.

3.1.1 UFSD A, B e C

Le curve I-V ottenute per i rivelatori prodotti dall'azienda CNM denominati A, B e C sono riportate in Figura 3.1 , 3.2, 3.3.

Per il rivelatore A, dati i grafici del costruttore, era attesa una curva I-V con corrente in crescita (in valore assoluto) nell'intervallo $0\div 20\text{ V}$; dopodiché questa

avrebbe dovuto seguire un andamento lineare con coefficiente angolare molto basso assestandosi su un valore di corrente dell'ordine di 10^{-7} A. I risultati ottenuti (Figura 3.1) mostrano un andamento totalmente diverso: la corrente continua a salire ben oltre l'intervallo precedentemente indicato ed assume un comportamento lineare solo dopo i 300 V. Inoltre la corrente misurata supera di ben 3 ordini di grandezza quella attesa. Si è quindi giunti alla conclusione che il rivelatore A sia in qualche modo compromesso. Effetti di bordo, sporcizia, elevate tensioni o usura in generale ne avranno compromesso il funzionamento. Le future misure effettuate con questo UFSD potrebbero quindi risultare pesantemente compromesse o comunque non in linea con quanto atteso.

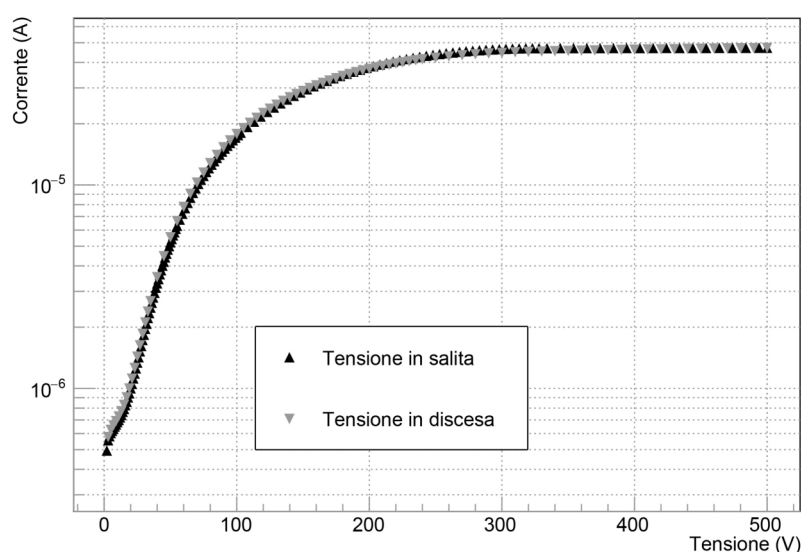
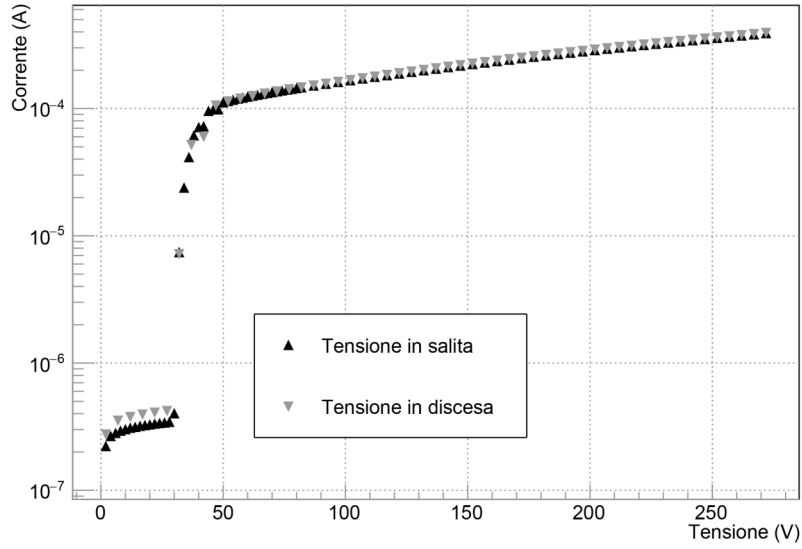


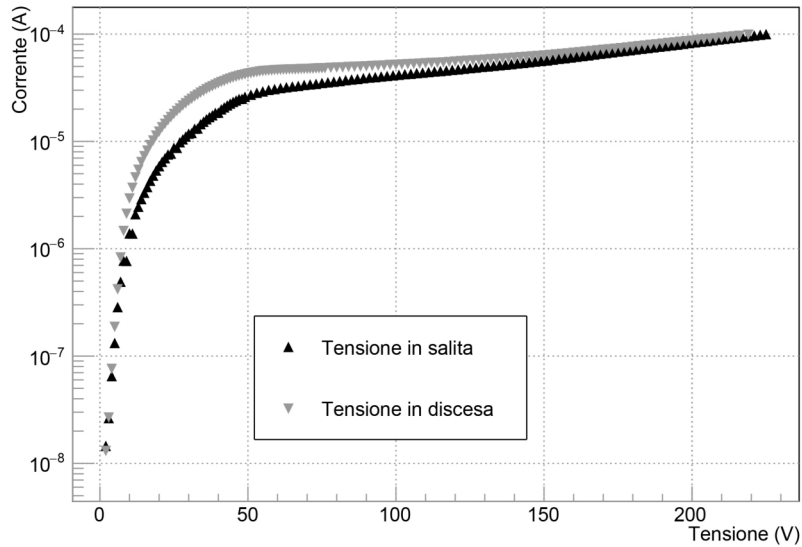
Figura 3.1: *Caratteristica rivelatore A*

Il comportamento del rivelatore B, invece, risulta perfettamente in accordo con quanto indicato dal produttore: lo strato di guadagno si attiva entro i primi 50 V, la corrente in pochi Volts aumenta di circa 3 ordini di grandezza per poi assumere un comportamento lineare assestandosi su valori dell'ordine di 10^{-4} A. L'esito delle misure conferma quanto appena detto (Figura 3.2).

Del rivelatore C non si è riuscito ad identificare con esattezza la curva I-V corrispondente fornita dal costruttore, perciò verranno solo illustrati i risultati delle misure. La corrente si porta ad un valore dell'ordine di 10^{-4} A nei primi 50 V, successivamente assume un andamento lineare con basso coefficiente angolare. É da notare che, a differenza dei rivelatori A e B, in questo caso abbiamo un andamento leggermente diverso fra la curva I-V realizzata con tensione in salita e quella con tensione in discesa. Si tratta, tuttavia, di differenze piccole presenti solamente nelle regioni 'instabili' del dispositivo (zona prossima all'attivazione dello strato di


 Figura 3.2: *Caratteristica rivelatore B*

guadagno). Poichè di solito non si utilizza l'UFSD in tali regioni, questo comportamento non dovrebbe comprometterne il funzionamento indipendentemente da come si raggiunge la tensione di lavoro.


 Figura 3.3: *Caratteristica rivelatore C*

3.1.2 UFSD D0, D1, E, H e Matrice

Tutti questi rivelatori sono stati realizzati dall'azienda FBK (Fondazione Bruno Kessler di Trento), solamente del rivelatore H e della Matrice si è riusciti a trovare una corrispondenza certa con i dati forniti dal costruttore (il cui confronto con le

misure ha avuto esito positivo). Di tutti verranno quindi illustrati solo i risultati di misura.

Il rivelatore D0 nei primi 20 V raggiunge rapidamente una corrente di 10^{-5} A (attivazione dello strato di guadagno). Il valore resta costante fino alla tensione di circa 400 V dove si osserva la corrente aumentare molto rapidamente, i dati indicano chiaramente che si è raggiunta la zona di breakdown. L'andamento della curva con tensione in discesa è leggermente diverso, i motivi di questa discrepanza verranno illustrati nel paragrafo successivo. La caratteristica I-V misurata è mostrata in Figura 3.4.

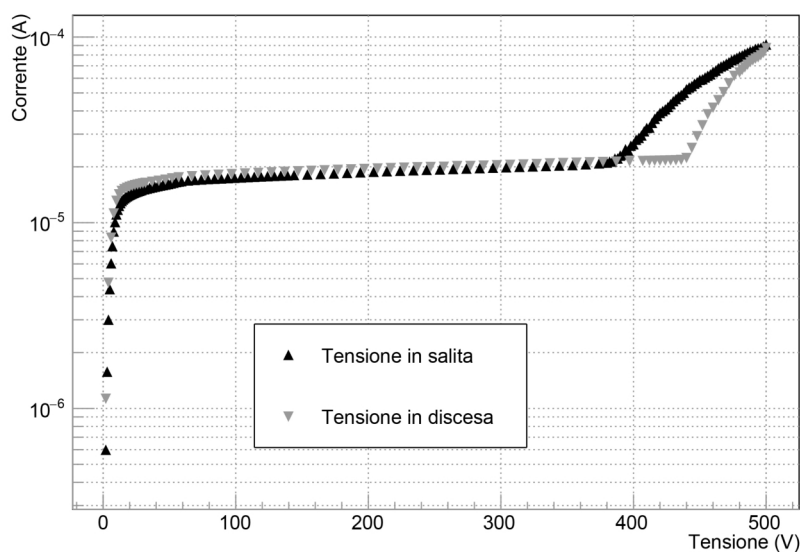
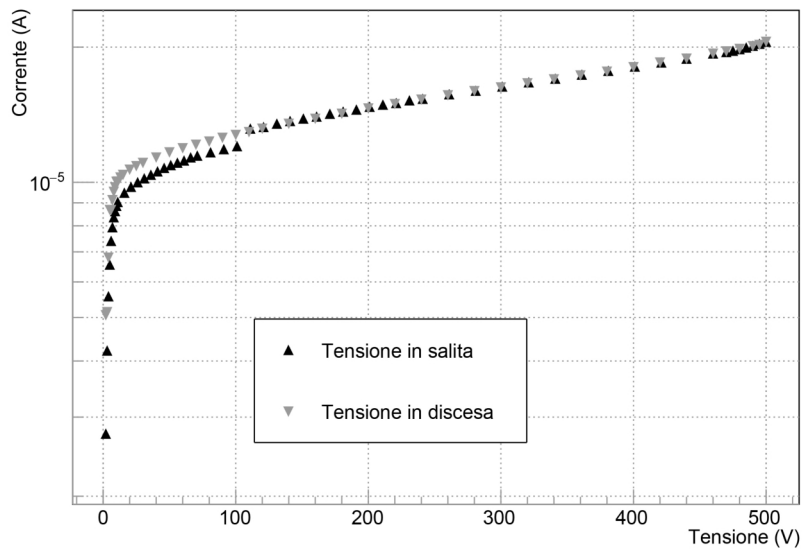


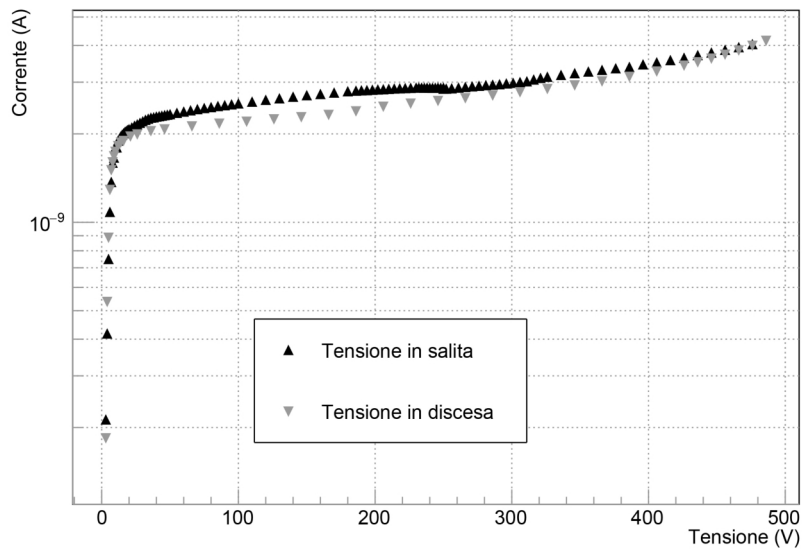
Figura 3.4: *Caratteristica rivelatore D0*

L'UFSD D1 raggiunge anch'esso molto rapidamente 10^{-5} A nei primi 10 V ma in questo caso non è visibile breakdown nel range di tensioni analizzato, Figura 3.5. Una particolarità di questo rivelatore consiste in un piccolo gradino in corrente visibile a circa 100 V nella curva con la tensione in salita. Paragonandola con la caratteristica realizzata con tensione in discesa sembrerebbe suggerire la presenza di un offset che ad un certo punto si è aggiunto a tutte le misure. Si è dunque realizzata un'ulteriore caratteristica dello stesso rivelatore a qualche giorno di distanza notando che un gradino analogo era questa volta presente alla tensione di circa 400V. Non si è riuscita ad individuare la causa di questo comportamento né nel rivelatore né negli strumenti di misura, ci si limita dunque ad illustrare il fatto.

Per il rivelatore E si è misurata la caratteristica mostrata in Figura 3.6. La corrente in questo rivelatore è molto più piccola rispetto ai precedenti. Oltre i 20 V questa assume un andamento lineare mantenendosi dell'ordine di 10^{-9} A. Un leggero cambiamento di inclinazione della caratteristica si osserva nell'intorno


 Figura 3.5: *Caratteristica rivelatore D1*

di 250V, tuttavia questo non è sufficientemente ampio per suggerire un passaggio nella zona di breakdown che avviene probabilmente poco dopo la tensione massima raggiunta.


 Figura 3.6: *Caratteristica rivelatore E*

Il rivelatore H è l'unico per il quale si riesce ad apprezzare l'intero profilo della caratteristica che rientra perfettamente nel range di lavoro dell'apparato di misura, Figura 3.7. Le correnti di questo rivelatore sono ancora più piccole del precedente, nella zona stabile sono infatti dell'ordine di 10^{-10} A. Tra i 30 e i 40 V si nota l'attivazione dello strato di guadagno; nel giro di pochi Volts la corrente raggiunge

una configurazione stabile che persiste nell'intervallo $50 \div 250$ V. Superato questo valore l'UFSD entra in breakdown. Anche in questo caso c'è discrepanza fra le curve in salita e in discesa fuori dalle regioni stabili, nel prossimo paragrafo si discuterà brevemente questo aspetto.

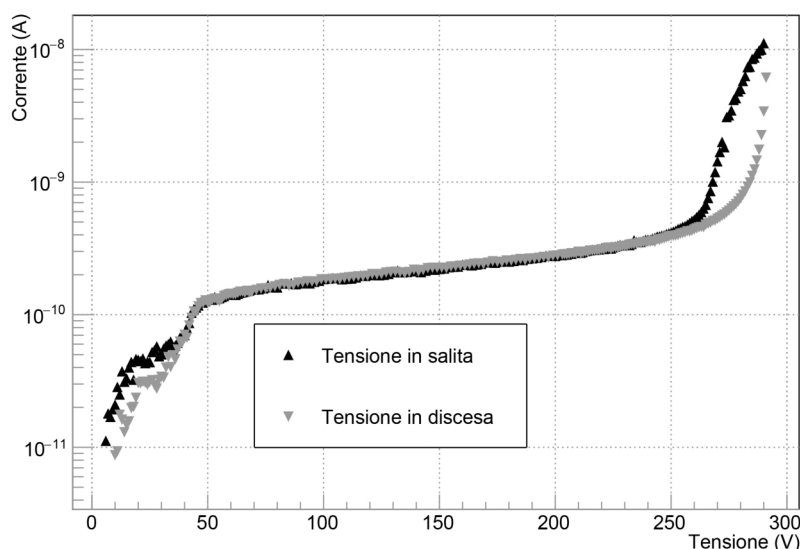


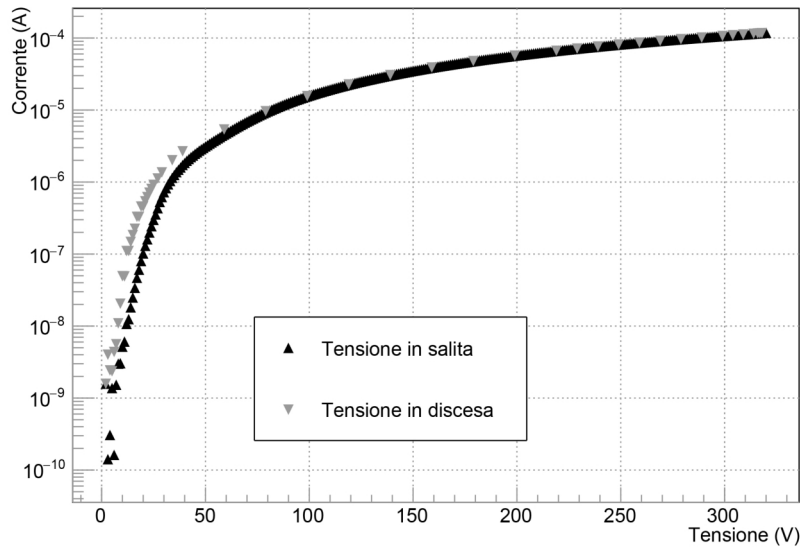
Figura 3.7: *Caratteristica rivelatore H*

L'ultima caratteristica I-V realizzata riguarda la matrice di UFSD (Figura 2.3). Essendo i 4 rivelatori alimentati in parallelo, è doveroso sottolineare che il significato fisico della curva realizzata è diverso dalle precedenti. Questa infatti può essere vista come la curva I-V dei 4 dispositivi che, seppur ottenuti dallo stesso wafer, avranno sicuramente dei comportamenti leggermente diversi fra loro. Nella situazione ideale di 4 UFSD perfettamente identici, questa rappresenterebbe la caratteristica comune ai 4 rivelatori.

Il grafico ottenuto è mostrato in Figura 3.8. La corrente nei 4 UFSD risulta in crescita anche oltre i 50 V e copre tutto il range di valori compreso nell'intervallo $10^{-10} \div 10^{-4}$ A. Il comportamento risulta uniforme e stabile, tuttavia, per preservare la matrice, non si è superata la tensione di 300 V poichè un eventuale breakdown di uno dei 4 UFSD sarebbe difficilmente individuabile in una caratteristica comune agli altri rivelatori.

3.1.3 Comportamento nelle regioni instabili

Tutte le caratteristiche presentate nei paragrafi precedenti sono state realizzate utilizzando il programma descritto nel paragrafo 2.2.1 dove è stata impostata una *Pausa dopo nuovo valore di tensione* di 2 s. Subito dopo un aumento della tensione appli-


 Figura 3.8: *Caratteristica rivelatore M*

cata, per come sono realizzati gli UFSD con guadagno, c'è un immediato aumento della corrente che tende ad una situazione stabile dopo un certo intervallo di tempo. Nelle regioni stabili, questo tempo di assestamento è ben al di sotto dei 2 secondi utilizzati per la presa dati, mentre in zone instabili come quelle di Breakdown con tensione in crescita, questo tempo di assestamento è ben più lungo per via dell'enorme carica generata da un aumento del potenziale applicato. Questo spiega le differenze nelle curve con tensione in salita e in discesa nelle zone di breakdown dei rivelatori D0 e H. Per quest'ultimo UFSD si è verificato sperimentalmente il comportamento appena descritto. I risultati sono mostrati in Figura 3.9 e rappresentano perfettamente il comportamento precedentemente descritto.

Si è fatta salire la tensione fino a 309 V con una *Pausa dopo nuovo valore di tensione* di 5 s; qui si è misurata una corrente di $2.5 \times 10^{-8} A$ e si è messa in pausa l'acquisizione. Dopo circa 5 minuti la corrente è scesa di circa 10 volte a $2.7 \times 10^{-9} A$, si è dunque ripresa l'acquisizione con tensione in discesa fino alla zona di stabilità a 255 V. È stata quindi effettuata una nuova rampa in salita con una pausa fra valori di tensione di 10 s subito seguita da una in discesa una volta raggiunti i 320 V.

3.2 Matrice UFSD 2x2

Altro punto importante di questo lavoro era quello di realizzare uno studio preliminare sulla matrice rappresentata in Figura 2.3. A tale scopo si sono effettuate 4 scansioni utilizzando come segnale rivelabile la fonte laser descritta nel paragrafo 2.1.5. Essendo i 4 UFSD parzialmente metallizzati, solo $1.5 \times 1.5 \text{ mm}^2$ dei 2×2

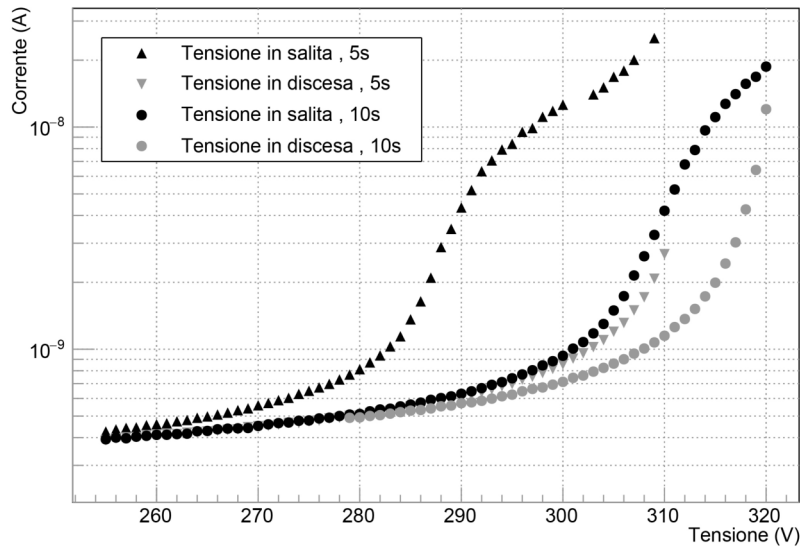


Figura 3.9: *Regione di Breakdown del rivelatore H con tempi di salita e discesa della tensione diversi*

mm^2 di superficie sono stati testati; in questa zona non si sono trovate discrepanze particolari rispetto a quanto atteso. La matrice è stata alimentata sempre a 295 V mentre l'amplificazione a 3.5 V.

Il principale limite nelle misure è risultato essere il diametro del fascio. Sebbene il diaframma avrebbe permesso di ottenere uno spot più piccolo di quello utilizzato, si è deciso di non scendere al di sotto di una data apertura poiché altrimenti il rapporto segnale/rumore delle misure sarebbe stato troppo basso. La maggior parte del segnale prodotto dalla testina laser, infatti, si perde selezionandone solo una piccola parte.

Il laboratorio dove sono state effettuate le misure sta per dotare la propria strumentazione di un sistema di lenti collimatrici e convergenti; questo concentrerà tutto il segnale prodotto in uno spot molto piccolo e renderà le future misure più precise di quelle effettuate con l'attuale sistema a diaframma.

3.2.1 Risultati delle scansioni

Si è numerati i 4 UFSD della matrice ed è stato associato ad ognuno di essi un colore secondo il criterio visibile nel dettaglio a destra della Figura 2.3. Le scansioni sono state effettuate una dopo l'altra durante la stessa mattinata tenendo sempre la matrice in tensione, nell'ordine che segue:

- Scansione Orizzontale UFSD 1 \rightarrow UFSD 2.
- Scansione Verticale UFSD 2 \rightarrow UFSD 3.

- Scansione Orizzontale UFSD 4 \rightarrow UFSD 3.
- Scansione Verticale UFSD 1 \rightarrow UFSD 4.

Si riporta questo dettaglio poichè gli UFSD hanno mostrato un leggero cambiamento nelle ampiezze dei segnali prodotti a diverse ore di distanza dall'accensione della matrice.

Ottenuta la fonte laser opportuna, utilizzando il programma di movimentazione realizzato, si è individuato il centro dei 4 UFSD. Sono quindi state effettuate le 4 scansioni con un passo di $50 \mu m$. l'Oscilloscopio lavorava utilizzando il trigger del controller laser, ad ogni scansione valutava il minimo del segnale nell'intervallo impostato (i valori di tensione erano negativi) e memorizzava tale valore prima di effettuare una nuova scansione. Ogni valore di tensione riportato nei grafici che seguono corrisponde alla media di circa 1000 punti per le scansioni 1 \rightarrow 2, 2 \rightarrow 3 e circa 500 punti per le scansioni 4 \rightarrow 3, 1 \rightarrow 4, opportunamente realizzata utilizzando le funzioni dell'Oscilloscopio. L'esito di queste 4 scansioni è riportato nelle Figure 3.10, 3.11, 3.12, 3.13.

Le dimensioni reali della zona sensibile sono riportate nelle Figure con delle linee tratteggiate, le rampe ai bordi, che danno segnale anche oltre la zona sensibile, sono una conseguenza del diametro del fascio laser utilizzato. Questo, infatti, ha dimensioni paragonabili allo spessore fra 2 aree attive (circa 0.5 mm), continua quindi ad illuminare il rivelatore anche se il centro dello spot è entrato nella zona metallizzata.

È facile notare che l'ampiezza del segnale prodotto dai 4 UFSD non è la stessa per tutti i rivelatori, il motivo di ciò è legato principalmente all'amplificazione (diversa) dei 4 segnali, questo aspetto verrà meglio approfondito nel prossimo paragrafo.

Altro aspetto importante da notare consiste nella variazione del segnale massimo prodotto dagli stessi UFSD a distanza di qualche ora fra una misura e l'altra. Se ad esempio si prende in esame l'ampiezza dell' UFSD 1 nella prima scansione in Figura 3.10 (realizzata fra le 12:15 e le 12:45) e l'ampiezza dello stesso rivelatore nell' ultima scansione in Figura 3.13 (realizzata fra le 15:40 e le 16:15), si nota una 'perdita' di circa il 20 % del segnale. Non si è approfondito ulteriormente questo aspetto poichè non è chiaro se fosse dovuto a cause esterne al rivelatore, ma una curva segnale-tempo per ogni UFSD della matrice effettuata in condizioni stazionarie, con un rapporto segnale/rumore più alto, potrebbe essere utile per determinare le condizioni ottimali di lavoro del rivelatore.

Sono state effettuate anche delle curve di efficienza per i 4 UFSD, queste sono riportate in Figura 3.14 per le scansioni orizzontali e in Figura 3.15 per quelle verticali. Queste sono state effettuate contando per ogni step il numero di segnali

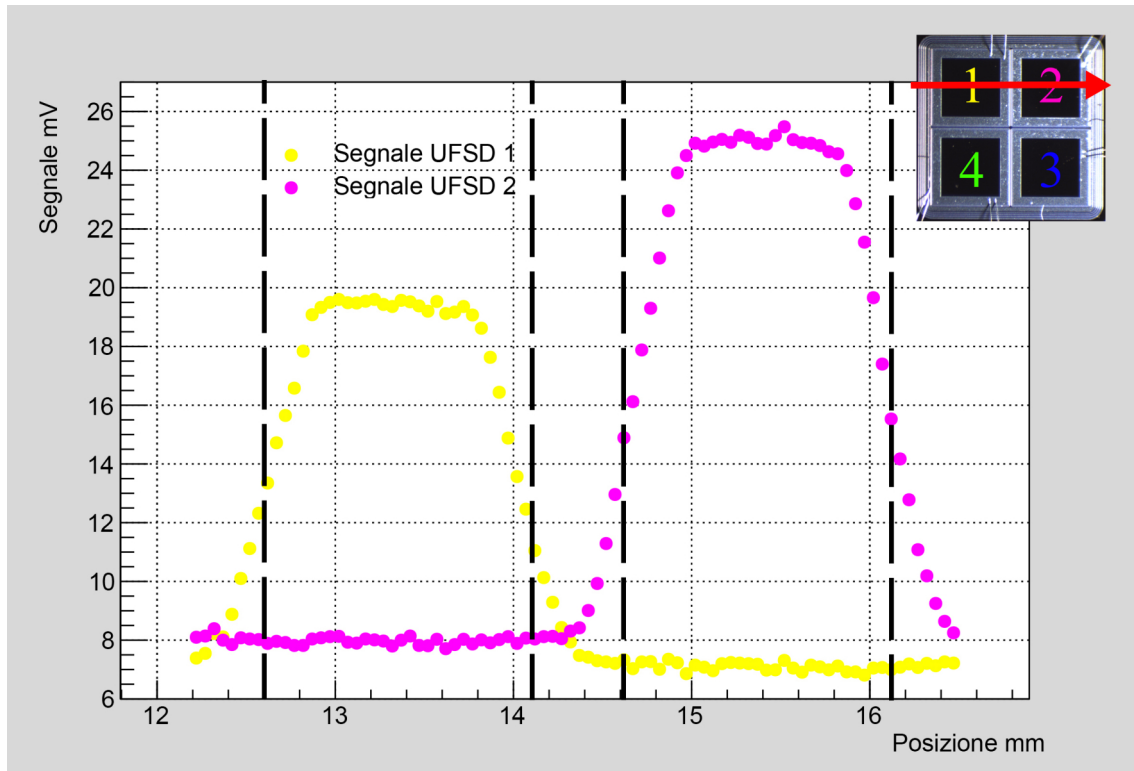


Figura 3.10: Risultato della scansione UFSD 1-2

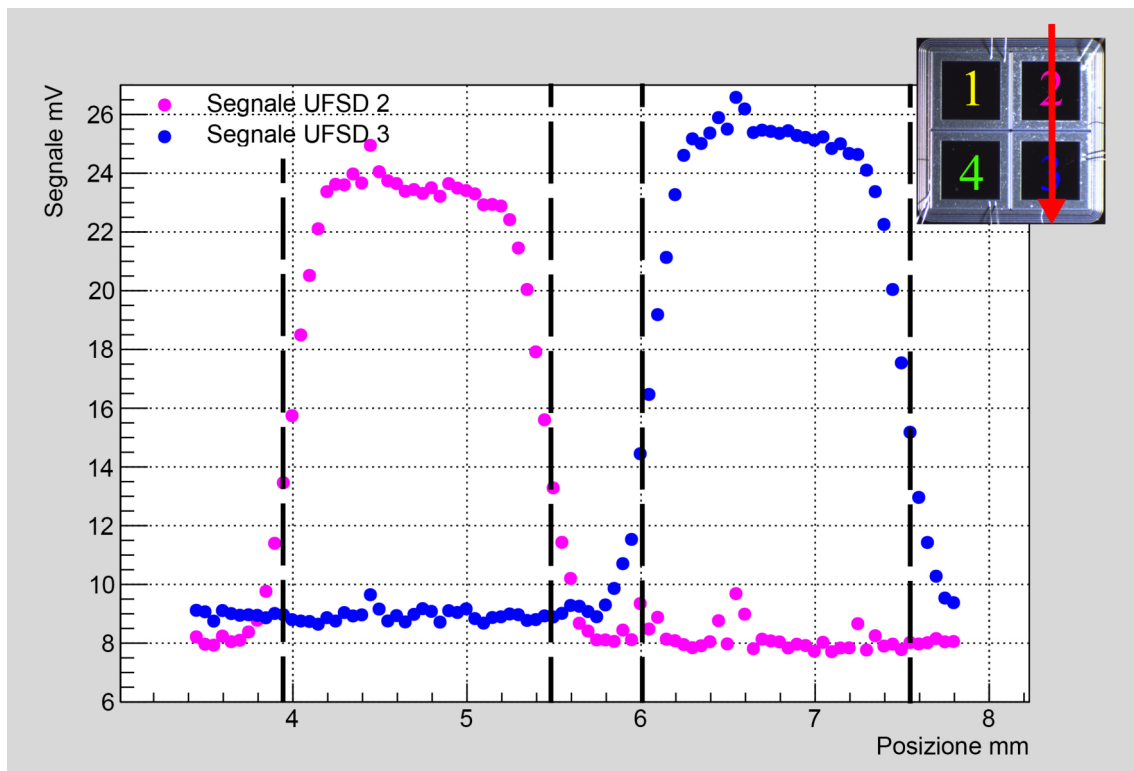


Figura 3.11: Risultato della scansione UFSD 2-3

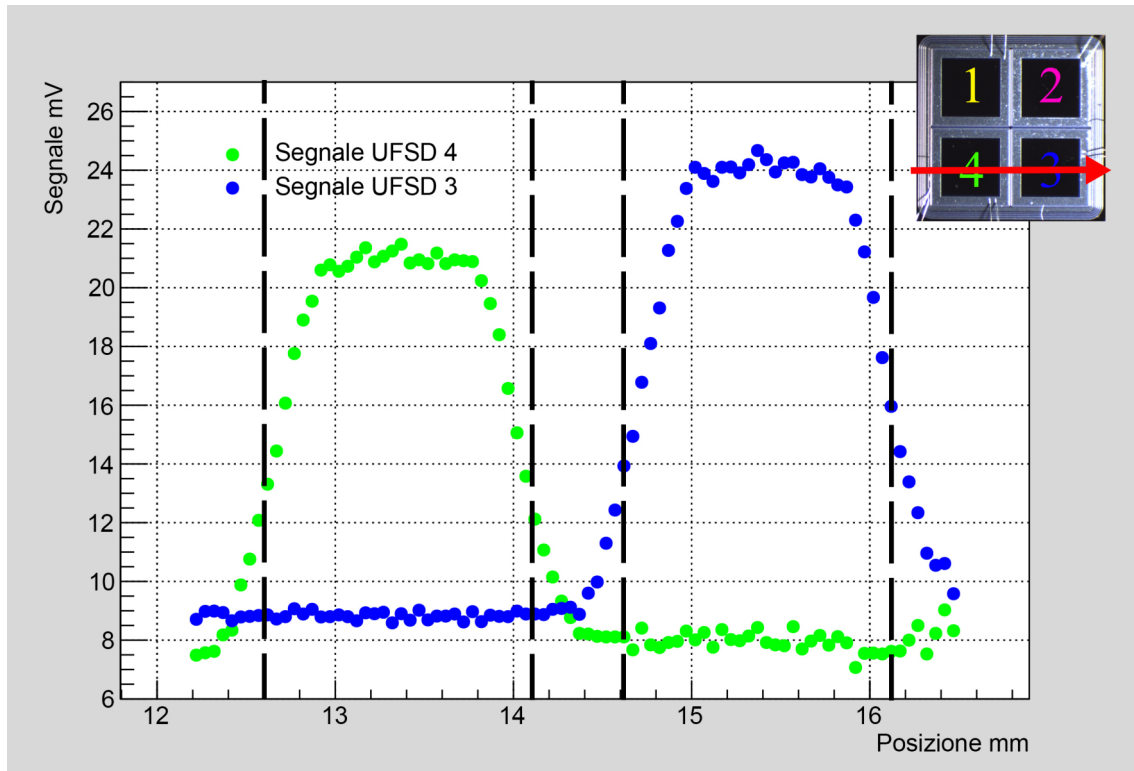


Figura 3.12: Risultato della scansione UFSD 4-3

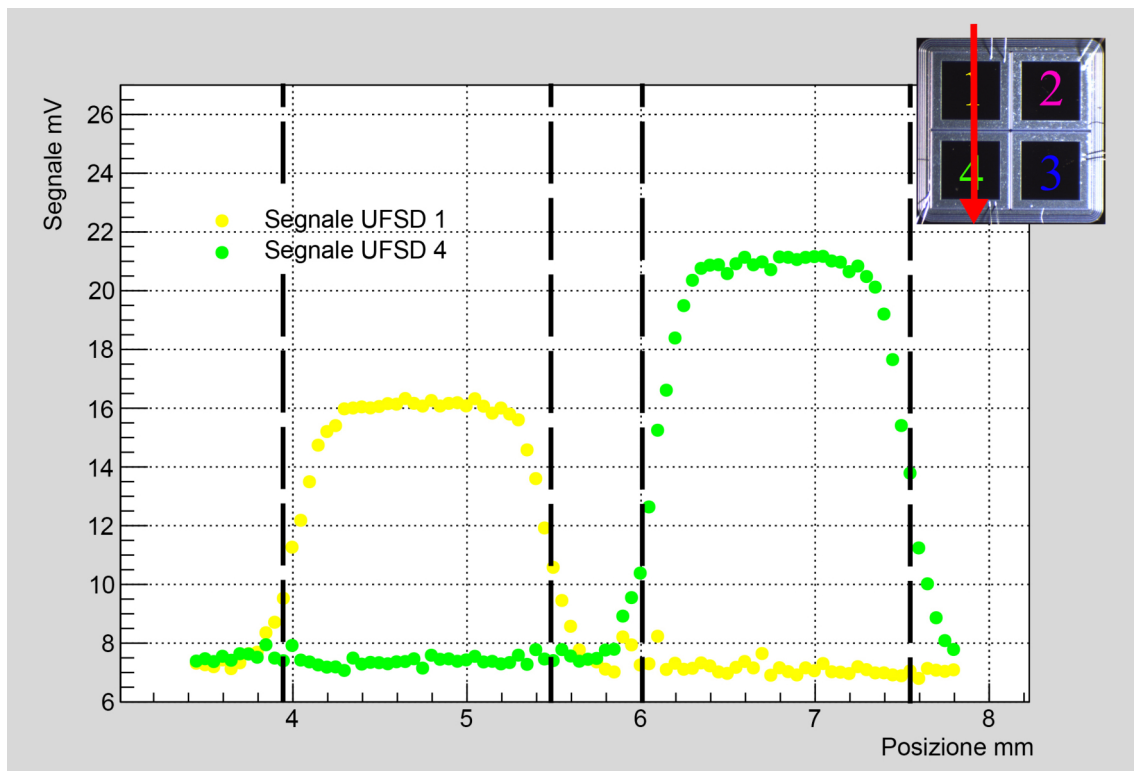


Figura 3.13: Risultato della scansione UFSD 1-4

registrati oltre una certa soglia e dividendo tale valore per il numero totale dei trigger ricevuti dall'oscilloscopio. La soglia è stata impostata per gli UFSD 1, 2 e 4 a -15 mV e per il rivelatore 3 a -17 mV ossia nella zona al di fuori di quella nella quale è contenuto il rumore. Per il rivelatore 3 si è utilizzata una soglia diversa perché questo era soggetto ad un'amplificazione più performante degli altri 3.

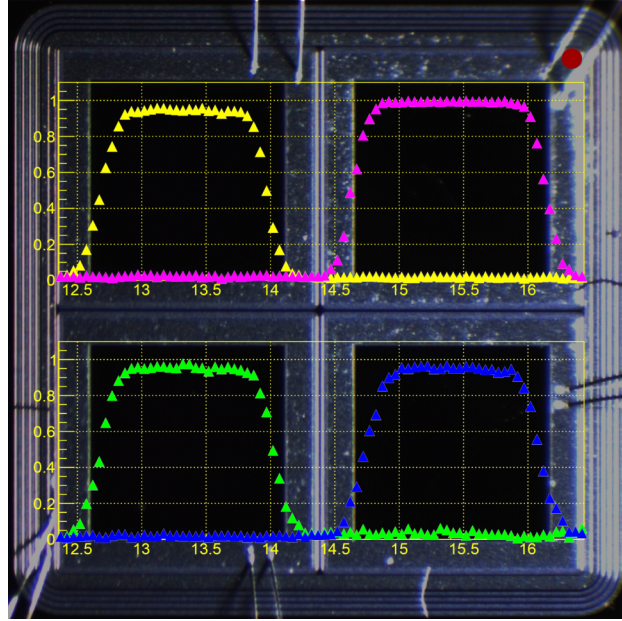


Figura 3.14: *Curve di efficienza scansioni orizzontali*

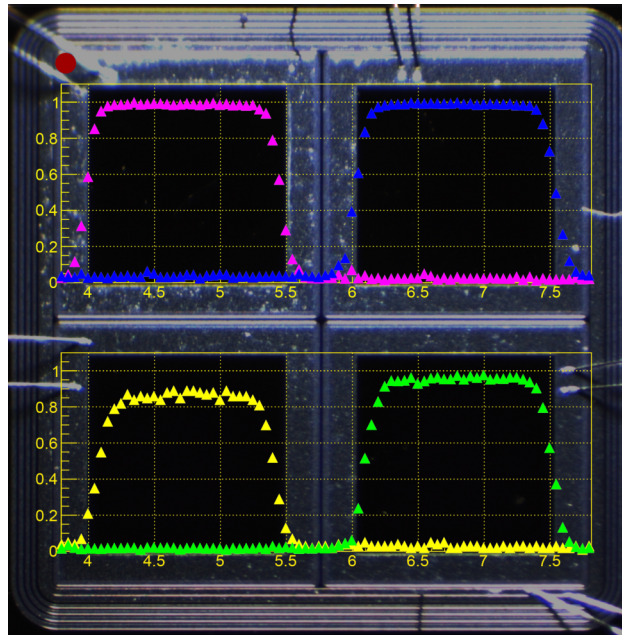


Figura 3.15: *Curve di efficienza scansioni Verticali*

3.2.2 Differenze fra i 4 UFSD

Sebbene i 4 UFSD appartengano allo stesso wafer e sono stati progettati per essere identici, differenze nei segnali prodotti sono state riscontrate nelle misure. La principale causa di ciò si è individuata nell'amplificazione dei segnali. Si è effettuata una misura di noise e segnale posizionandosi al centro dei 4 UFSD e mediando i risultati di circa 5000 trigger. Il picco lo si è valutato usando uno spot opportunamente ampio da generare un buon rapporto segnale/rumore, mentre il rumore è stato misurato, con la fonte laser disattivata, in due situazioni diverse: a matrice spenta e a matrice accesa (Figura 3.16).

Si è individuato il valore medio del rumore per tutti e quattro gli UFSD a matrice spenta e accesa (colonne 2 e 3 Tabella 3.1). È stata quindi calcolata l'amplificazione relativa del noise dei 4 rivelatori (usando quella dell' UFSD 3 come riferimento); per farlo si è diviso il rumore di ogni UFSD per il rumore del rivelatore 3. I risultati di questo calcolo sono riportati nelle colonne 4 e 5 della Tabella 3.1. Come si può notare non ci sono differenze sostanziali nelle due amplificazioni relative calcolate. La mancata differenza nelle misure del rumore a matrice spenta o accesa lascia quindi supporre che le 4 amplificazioni non siano perfettamente identiche.

Questo modo di procedere fornisce delle stime valide se si assume che il rumore sia lo stesso per tutti e 4 le coppie UFSD-amplificatore, questa potrebbe essere un'assunzione 'non esatta' dal momento che i segnali viaggiano attraverso canali fisici vicini ma comunque diversi. Se, tuttavia, l'approssimazione fosse corretta, allora potremmo correggere i valori medi dei segnali misurati dividendoli per l'amplificazione relativa ottenuta. I risultati di questa stima sono riportati in Tabella 3.2.

| UFSD | Noise Moff | Noise Mon | Amp.rel. Moff | Amp. rel. Mon |
|------|----------------|----------------|---------------|---------------|
| 1 | -11 ± 3 mV | -10 ± 3 mV | 0.69 | 0.71 |
| 2 | -13 ± 3 mV | -12 ± 3 mV | 0.81 | 0.86 |
| 3 | -16 ± 3 mV | -14 ± 3 mV | 1 | 1 |
| 4 | -13 ± 3 mV | -12 ± 3 mV | 0.81 | 0.86 |

Tabella 3.1: *Media rumore a matrice spenta, media rumore a matrice accesa , amplificazione relativa a matrice spenta e a matrice accesa. Come errore si è riportata la deviazione standard calcolata dall'oscilloscopio.*

I nuovi valori correnti sono decisamente più uniformi rispetto a quelli di partenza, anche se differenze fra i 4 UFSD sono ancora presenti. Questi risultati mostrano che la configurazione UFSD-amplificatore attuale risulta poco efficiente in termini di uniformità delle ampiezze dei segnali sui 4 rivelatori.

3.2. Matrice UFSD 2x2

| UFSD | Segnale | Correz. Moff | Correz. Mon |
|------|------------------------|--------------|-------------|
| 1 | $-48 \pm 3 \text{ mV}$ | -70 mV | -67 mV |
| 2 | $-64 \pm 4 \text{ mV}$ | -79 mV | -75 mV |
| 3 | $-74 \pm 4 \text{ mV}$ | -74 mV | -74 mV |
| 4 | $-61 \pm 4 \text{ mV}$ | -75 mV | -71 mV |

Tabella 3.2: *Media segnale con 1 deviazione standard di errore, e segnale corretto con fattore a matrice spenta e fattore a matrice accesa presentati in Tabella 3.1*

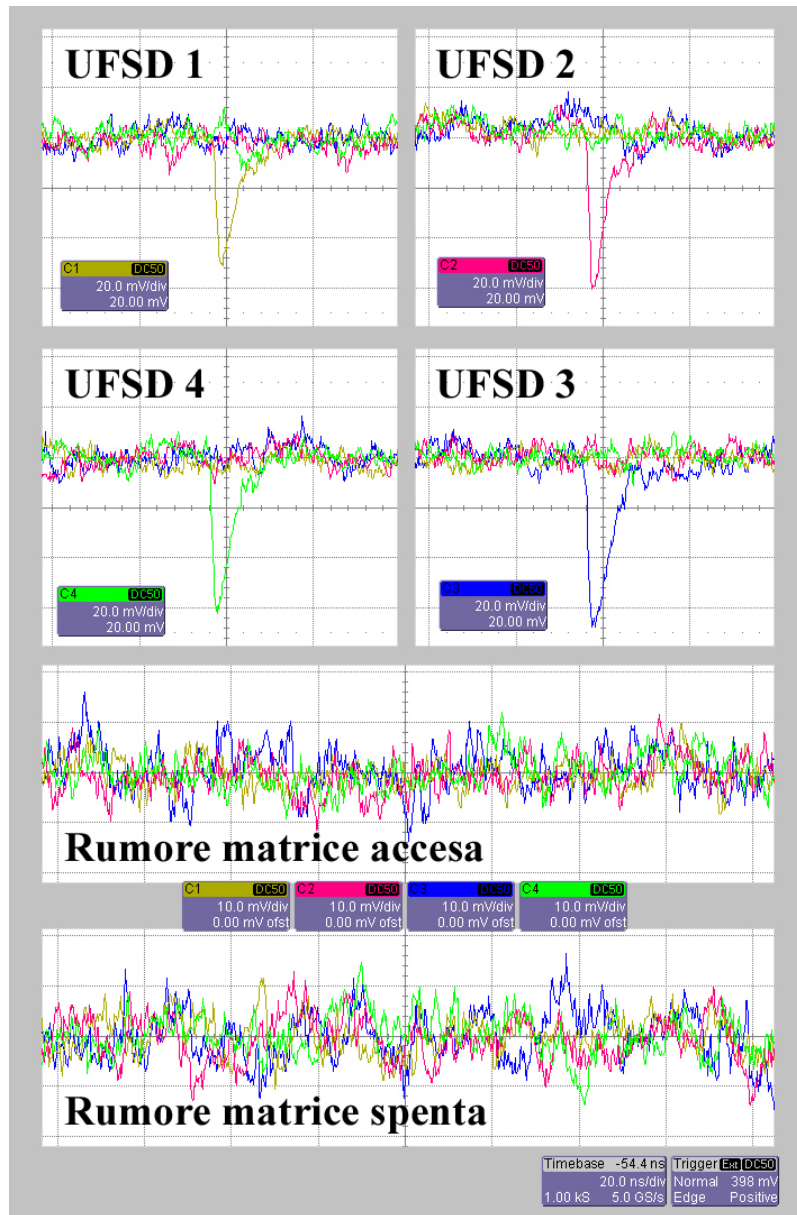


Figura 3.16: *Esempi di misure di picco al centro degli UFSD e del rumore con matrice spenta e accesa*

Conclusioni

In questa tesi sono stati sviluppati programmi dedicati alla caratterizzazione ed al test degli USFD, rendendo la procedura versatile e completamente automatica. Questi programmi potranno essere facilmente modificati per essere utilizzati con altri strumenti di misura. Inoltre, grazie ad una visualizzazione in tempo reale delle misure e del loro storico, tali programmi rendono possibile il confronto fra diversi dispositivi o diverse tecniche di caratterizzazione dello stesso rivelatore.

Questo studio ha messo in evidenza la necessità di opportuni miglioramenti nel set-up sperimentale onde poter rendere possibili valutazioni più accurate. Il limite attuale è rappresentato dall'ampiezza e dall'intensità del fascio laser utilizzato per i test sulla matrice, questi due fattori vanno opportunamente calibrati al fine di ottenere una fonte più intensa e stretta.

Lo studio sulla matrice ha mostrato un comportamento dei rivelatori, in tutta la zona sensibile, coerente con quanto atteso; ma ha evidenziato differenze nelle ampiezze dei 4 segnali prodotti utilizzando la stessa fonte laser. Purtroppo l'attuale configurazione non è completamente funzionale poichè non permette interventi di calibrazione sui singoli 4 rivelatori della matrice. Questi risultati saranno utili nelle fasi di progettazione e realizzazione delle future matrici di UFSD. Queste potrebbero, ad esempio, essere dotate di alimentazioni diverse per i vari rivelatori e/o per i loro amplificatori cosicché, variandole, si possano compensare eventuali differenze costruttive che determinano differenze nei segnali.

Appendice A: CAEN N1470

| | |
|------------------------|--------------------------------------|
| Output ranges | 8 kV / 3 mA, 8 kV / 300 μ A |
| Output channels | 4 |
| Max. Ch. Output Power | 9W |
| Vset / Vmis Resolution | 200 mV |
| Iset Resolution | 50 nA |
| Vmax resolution | ± 1 V |
| Ramp Up/Down | 1÷500 Volt/s, 1 Volt/s step |
| Vset vs. Vout Accuracy | $\pm 0,02\%$ of read value ± 2 V |

Appendice B: Keithley 6487

Specifiche Generali:

| | |
|---------------------------|---|
| Temperature coefficient | For each °C, add 0.1 x (% rdg + offset) |
| Maximum input capacitance | 10nF on all rang., 1μF on 20μA, 200μA, mA rang. |
| Maximum input voltage | 505 VDC |
| Analog output impedance | < 100Ω, DC-2kHz |
| Output resistance | < 2.5Ω |
| Autoranging time | < 250ms |
| Conversion time | from 0,01 PLC to 60 PLC |
| Digital Filter | Median and averaging from 2 to 100 readings |

Valutazione dell'errore nella misura di corrente:

| Range | Resolution | Error | Typical RMS noise |
|--------|------------|-----------------|-------------------|
| 2 nA | 10 fA | 0.3 % + 400 fA | 20 fA |
| 20 nA | 100 fA | 0.2 % + 1 pA | 20 fA |
| 200 nA | 1 pA | 0.15 % + 10 pA | 1 pA |
| 2 μA | 10 pA | 0.15 % + 100 pA | 1 pA |
| 20 μA | 100 pA | 0.1 % + 1 nA | 100 pA |
| 200 μA | 1 nA | 0.1 % + 10 nA | 100 pA |
| 2 mA | 10 nA | 0.1 % + 100 nA | 10 nA |
| 20 mA | 100 nA | 0.1 % + 1 μA | 10 nA |

Appendice C: EIG2000DX e PiL036X

EIG2000DX controller:

| | |
|--------------------------------------|-------------------------|
| Repetition rate, external trigger | 2 single shot - 120 MHz |
| Repetition rate, internal trigger | 50 Hz - 120 MHz |
| External trigger impedance | 50 Ω |
| Synchronization output trigger delay | ~ 35 ns |

Laser PiL036X:

| | |
|----------------|-------------------------------------|
| Wavelength, nm | 1057 nm |
| Tolerance | ± 20 nm |
| Spectral width | < 15 nm |
| Pulse width | < 60 ps |
| Peak power | > 100 mW |
| Average power | 1 W for collimated beams at 100 MHz |

Appendice D: Standa stepper e motor controller

8SMC5 Controllers Series:

| | |
|-----------------------------------|----------------------|
| Number of axes | 2 (single USB port) |
| Motor type | stepper |
| Current | 0.1-3A |
| Voltage | 2-48 Vdc |
| Step division (for stepper motor) | 1-1/256 |
| Maximum speed | 35000 steps/s |
| Communication interface | Ethernet, USB, RS232 |
| Motor connector | DB15F |

Motorized Translation Stages 8MT167-25:

| | |
|-------------------------------------|----------|
| Travel range, mm | 25 |
| Resolution full step, μm | 5 |
| Resolution 1/8 step, μm | 0.625 |
| Repeatability, μm | 1.5 |
| Maximum speed, mm/s | 25 |
| Maximum load Horizontal, Kg | 30 |
| Maximum load Vertical, Kg | 7 |
| Motor connector | HDB15(M) |

Bibliografia

- [1] *8SMC4-USB User Manual*. Standa Ltd, 2015.
- [2] Carnesecchi F. *Experimental study of the time resolution for particle detectors based on MRPC, SiPM and UFSD technologies*. Tesi di Dottorato XXX ciclo. Università degli studi di Bologna, 2018.
- [3] Cartiglia N. et al. *Performance of Ultra-Fast Silicon Detectors*. In: 13th Topical Seminar on Innovative Particle e Radiation Detectors. Ott.2013.
- [4] Cartiglia N. et al., *Design optimization of ultra-fast silicon detectors*. In: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A 765, 2015, pp. 141-148.
- [5] Fernández-Martínez P. et al. *Low Gain Avalanche Detectors for High Energy Physics*. In: 10th Spanish Conference on Electron Devices (CDE), 2015.
- [6] Ferrero M., INFN Torino, *Developments in the Production of Ultra-Fast Silicon Detectors*, IEEE NSS-MIC, Atlanta, Georgia, 21-28 Oct 2017.
- [7] Fini E. *Studio degli effetti di bordo su rivelatori al silicio ultraveloci*. Tesi di Laurea. Università degli studi di Bologna, 2016.
- [8] Glenn F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*. Fourth edition. John Wiley & Sons Inc, 2010.
- [9] Greco V. et al., *Latest measurements of LGAD diodes fabricated at IMB-CNM*, 9th “Trento” Workshop on Advanced Silicon Radiation Detectors, Genova, February 26-28, 2014.
- [10] <https://www.caen.it/>
- [11] *LabVIEWTM User Manual*, National Instruments, 2003.
- [12] Millman J., Grabel A. e Terreni P., *Elettronica di Millman*. Quarta edizione. McGraw-Hill, 2013.

- [13] *Model 6487 Picoammeter/Voltage Source Reference Manual*. Keithley Instruments, 2011.
- [14] Pellegrini G. et al., *Technology developments and first measurements of low gain avalanche detectors (LGAD) for high energy physics applications*, in: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A 765, 2014, pp 12- 16.
- [15] Picerno A. *Caratterizzazione di rivelatori al silicio innovativi*. Tesi di laurea mag. Università degli studi di Torino, 2014.
- [16] Sadrozinski H. et al., *Sensors for ultra-fast silicon detectors*, in: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A 765, 2014, pp 7-11.
- [17] Sadrozinski H. F.W. et al. *Ultra-fast silicon detectors*. In: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A 730, 2013, pp. 226-231.